INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | OCTUBRE 2013 | N.° 445

MATEMÁTICAS DEL PLANETA TIERRA | ¿CÓMO AFECTA EL SUEÑO A LAS SINAPSIS? | INSECTOS NECRÓFAGOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEUROCIENCIA
¿Cómo afecta el sueño a las sinapsis?

ENTOMOLOGÍA
Uso forense de insectos necrófagos

HISTORIA
El rompecabezas infrarrojo de Herschel

$X' = -\sigma X + \sigma Y,$

$Y' = -XZ + rX - Y,$

$Z' = XY$

INFORME ESPECIAL

Matemáticas del planeta Tierra

Una ciencia global para un mundo complejo y cambiante

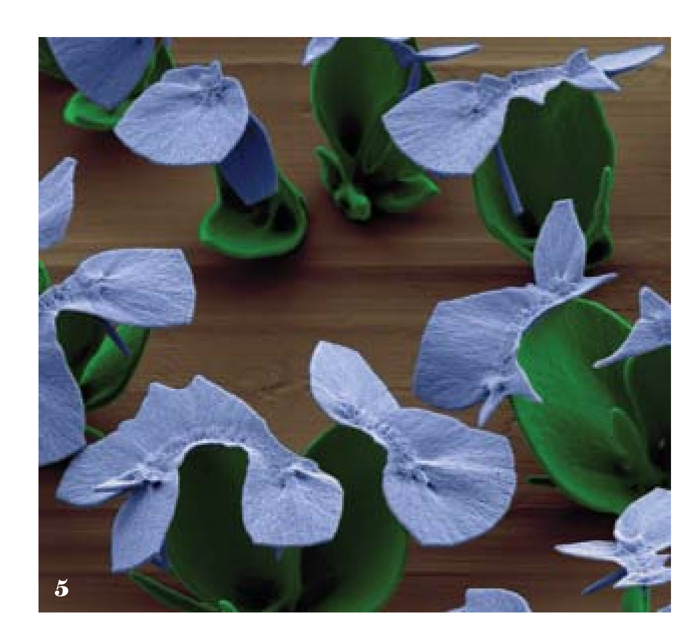


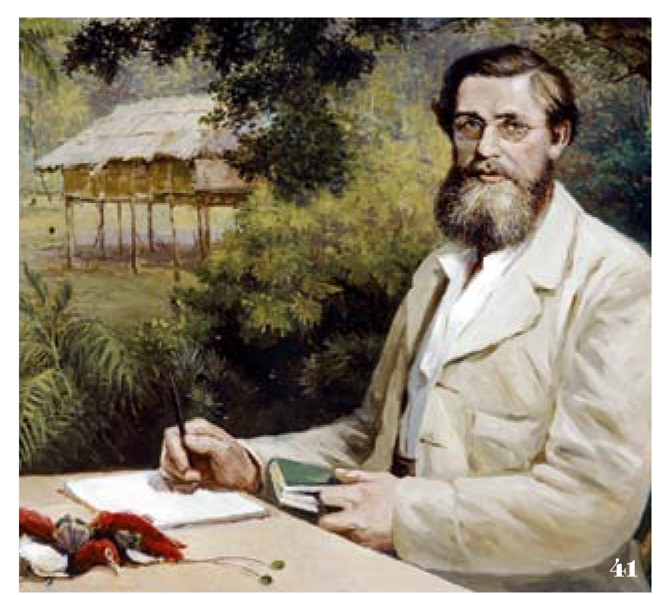
6,50 EUROS



ARTÍCULOS

MIRKO ILIĆ


5

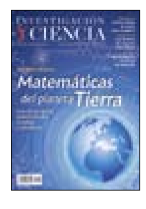

41


46

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Docenas de sociedades científicas han declarado el 2013 Año de las Matemáticas del Planeta Tierra. La iniciativa pretende destacar el papel clave de esta ciencia a la hora de modelizar un mundo cambiante y cada vez más complejo. En la actualidad, las matemáticas se aplican a diversas disciplinas globales, desde la geofísica y la climatología hasta la ecología, la epidemiología o nuestro comportamiento social. Imagen de iStockphoto/RomanOkony e *Investigación y Ciencia*.

redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo y junio 2013

EVOLUCIÓN ESTELAR

En «Origen y evolución de los cúmulos estelares» [Investigación y Ciencia, mayo de 2013], Steven W. Stahler propone que la expansión de ciertos grupos estables de estrellas, los cúmulos abiertos, se debería a las estrellas binarias (parejas de estrellas que orbitan en torno a un centro común). Uno de los diagramas del artículo ilustra la manera en que una estrella de gran masa se acerca a uno de esos pares, forma una nueva pareja estable con el mayor de los dos astros y acaba expulsando el más ligero. Consideremos, sin embargo, el mismo estado final pero con las velocidades invertidas: ¡la estrella más ligera irrumpiría y acabaría expulsando la mayor de todas!

Ken Knowlton
Sarasota, Florida

Según Stahler, cuando un sistema binario de un cúmulo abierto expulsa una tercera estrella, esta última interacciona con los otros miembros del cúmulo e intercambia con ellos energía, lo que de manera efectiva «calienta» el cúmulo y hace que este se expanda. Pero, en ese proceso, ¿no perdería energía la pareja expulsora? Ello menguaría las órbitas de sus astros y tal vez contribuyese a mantener compacto el cúmulo.

K. Cyrus Robinson

En palabras de Stahler, las estrellas se materializan «por coalescencia en el interior de inmensas nubes compuestas fundamentalmente por moléculas de hidrógeno, junto con otros elementos y una pequeña proporción de polvo». Conocemos bien el proceso por el que fueron creados los elementos, pero ¿en qué consiste la naturaleza de ese polvo? ¿Cómo se originó?

Harold W. Simons
Weiser, Idaho

Responde Stahler: *Con referencia a la pregunta de Knowlton, los sistemas de estrellas en interacción evolucionan de acuerdo con pautas bien definidas. Dicho comportamiento demuestra que la entropía total del sistema aumenta a medida que este evoluciona según dichos patrones. Es cierto que, al menos en principio, siempre resultaría posible invertir las velocidades de todas las estrellas y hacer que el sistema regresase a un estado de baja entropía. Sin embargo, la probabilidad de que algo así suceda se torna infinitamente pequeña a medida que aumenta el número de estrellas en el cúmulo.*

Robinson se halla en lo cierto al afirmar que, tras expulsar a la estrella más ligera, el par que permanece pierde energía y sus componentes describen órbitas menores. No obstante, semejante variación resulta minúscula en comparación con el aumento que experimentan las dimensiones totales del cúmulo.

En cuanto al polvo interestelar, este se compone de partículas de tamaño submicrométrico, formadas por silicatos y recubiertas por una capa de hielo. Dichas partículas se condensan a partir de los lentos vientos estelares que emanan de las gigantes rojas. Durante los procesos de formación estelar, esos humildes granos de polvo llegan a formar planetas rocosos, por lo que a ellos debemos también el origen de la Tierra.

LA MASA DEL NEUTRINO

En «Mensajeros fantasmales de nueva física» [Investigación y Ciencia, junio de 2013], Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod describen el estado de la investigación actual en torno al neutrino.

Una de las dificultades para entender las propiedades de dicha partícula reside en su masa. Como expone el artículo, durante el proceso de desintegración beta, un núcleo atómico emite un electrón y un antineutrino (o dos de ellos, en el caso de dos desintegraciones simultáneas).

En vista de la dificultad que reviste medir la masa de las partículas que participan en dicho fenómeno, me gustaría saber con qué precisión pueden medirse hoy en día las masas del neutrón, el protón y el electrón. Si tales mediciones gozasen de la precisión suficiente, la masa del antineutrino quedaría determinada por una ecuación sencilla.

En caso de no alcanzar la precisión suficiente, ¿no podrían mejorarse las mediciones de la masa de esas partículas mediante técnicas más avanzadas?

Carl Gruel
Kilmarnock, Virginia

Responde Päs: *En efecto, a fin de determinar la masa del neutrino se estudian los procesos de desintegración beta. No obstante, la relatividad especial establece la equivalencia entre masa y energía, por lo que el cálculo de la masa del antineutrino emitido no se reduce a una simple diferencia entre la masa del neutrón y la suma de las masas del protón y el electrón; en dicha ecuación intervienen, además, la energía cinética del antineutrino y la del electrón. La manera de proceder consiste en examinar la máxima energía posible del electrón y comprobar si este puede hacerse cargo de la cantidad de energía necesaria para cuadrar la balanza. En caso contrario, la diferencia corresponde a la masa del neutrino.*

El problema, pues, se reduce esencialmente a medir la energía del electrón. El instrumento adecuado para tal fin es un espectrómetro. En estos momentos se encuentra en construcción en la ciudad alemana de Karlsruhe el experimento KATRIN, que incluye un enorme espectrómetro de 24 metros de longitud.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MEDICINA

Analgésico espinoso

Aunque la medicina ha avanzado lo suficiente como para tratar cefaleas, distensiones musculares y la agonía de empastarse una muela, el dolor inflamatorio (como el resultante de la artrosis, el cáncer de huesos o las lesiones de espalda) constituye un objetivo mucho más esquivo. Los remedios actuales, incluidos la morfina y otros opiáceos, afectan de forma masiva a todos los nervios del cuerpo, provocando peligrosos efectos secundarios. Tratamientos locales, como las inyecciones de esteroides, pierden efecto con el tiempo. Un nuevo estudio trabaja con la toxina extraída de un raro cactus marroquí, que podría proporcionar un alivio local y permanente del dolor con solo una inyección.

El compuesto, denominado resiniferatoxina (RTX), funciona destruyendo específicamente las neuronas responsables del dolor inflamatorio. Estas neuronas se extienden desde la periferia del cuerpo (incluidos la piel y los órganos internos) hasta la médula espinal, transportando las señales dolorosas a lo largo de sus axones hacia el cerebro. Inyectada directamente en el fluido espinal, la RTX reconoce y mata únicamente las neuronas que producen la proteína TRPV1, la cual transmite la sensación de calor nocivo e inflamación. No perjudica al tejido normal ni a otros nervios nocirreceptores, como los que producen la sensación de pinchazos o pellizcos.

La RTX se ha utilizado en ensayos con perros que sufrían dolor debilitante y los resultados son prometedores. A diferencia de los roedores, los perros experimentan el dolor de una forma similar a las personas. «Y tienen personalidad», afirma Andrew Mannes, de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. (NIH). «Podemos obtener información sobre su psique que no es posible conseguir en el caso de las ratas.»

Los NIH están ensayando RTX en personas con cáncer avanzado. Aunque Mannes y sus colaboradores no pueden predecir cuándo tendrán datos, el estudio ha despertado el interés de los expertos en dolor. Según David Maine, del Centro Médico Mercy de Baltimore, hay otras formas de eliminar las fibras nocirreceptoras, como el uso del alcohol para destruir los nervios, pero en ocasiones el dolor vuelve y se intensifica. «Cuando se puede determinar con precisión dónde actuará un medicamento y evitar otras consecuencias, se ha encontrado una buena herramienta», afirma Maine.

—Arlene Weintraub

MATTHEW BILLINGTON

TECNOLOGÍA

Los robots ya saben escuchar

Los robots ya pueden entender y reaccionar ante la voz gracias a programas de reconocimiento de voz, como el Siri de iPhone. Sin embargo las máquinas «inteligentes» tienen dificultades a la hora de interpretar otros sonidos. «En cierto sentido el problema es más sencillo, pero se ha trabajado poco con los ruidos ambientales», afirma Joseph Romano, experto en robótica de Rethink Robotics, en Boston. «Esos ruidos no forman parte de la información con la que se ha programado a los robots.»

Ahora, Romano quiere que las máquinas hagan algo más que escuchar nuestras conversaciones. Junto con sus colaboradores de la Universidad de Pensilvania ha creado una herramienta informática denominada ROAR (sistema operativo robótico de reconocimiento de audio de código abierto) que permite que los aparatos respondan a una gama de sonidos mucho más amplia. Como se describe en un número reciente de la revista *Autonomous Robots*, el requisito fundamental de la herramienta es un simple micrófono.

Para comenzar el entrenamiento, el micrófono del robot capta primero el sonido ambiente, permitiendo a ROAR eliminar el ruido estático. Después, el operador enseña a ROAR a reconocer los sonidos clave realizando repetidamente una acción concreta, como cerrar una puerta o activar la alarma de un teléfono móvil, y etiquetando las características sonoras únicas de la misma mientras el aparato escucha. Finalmente, el programa crea un modelo general del sonido de cada acción a partir de esa serie de grabaciones de entrenamiento.

El grupo ensayó la herramienta ROAR en un brazo robótico, lo que mejoró su capacidad para llevar a cabo ciertas tareas. En una de las pruebas, el robot intentaba agarrar y activar de forma autónoma una taladradora eléctrica. Sin información sonora, el brazo solo lo consiguió en nueve de cada veinte intentos, pero su tasa de éxito se duplicó al utilizar ROAR. Si después de un intento la máquina no oía el zumbido del motor eléctrico, reajustaba su agarre y lo intentaba de nuevo.

El paso siguiente consiste en asegurar que el sistema funcione en entornos ruidosos. La integración de la información sonora en el ciclo de información de un robot junto con estímulos visuales y táctiles podría permitir que un día haya enfermeras mecánicas que respondan rápidamente a las peticiones de ayuda o que los robots de las fábricas reaccionen cuando algo se rompe. Aunque la tecnología aún se encuentra en pañales, Romano piensa que tiene un enorme potencial.

—Gregory Mone

¿QUÉ ES ESTO?

No se trata de flores azules creciendo en la tierra, sino de cristales de sílice y carbonato de bario sobre un portaobjetos de vidrio. Wim L. Noorduin, estudiante postdoctoral en la Universidad Harvard, consigue que la formación de los cristales produzca diseños que recuerdan a hojas, tallos y pétalos, para fotografiarlos mediante un microscopio electrónico de barrido. Después, colorea las imágenes en blanco y negro.

Las variaciones en las formas provienen de pequeños cambios en la temperatura, la acidez o el contenido en dióxido de carbono de una disolución química. Esta técnica de automontaje, publicada en mayo en la revista *Science*, podría llegar a sustituir en un futuro a las litografías utilizadas para la fabricación de microchips, una técnica costosa en tiempo y en dinero. Los métodos de Noorduin también podrían aumentar la eficiencia de los catalizadores químicos por medio de superficies con arrugas y pliegues que aceleran las reacciones en cadena.

—Luciana Gravotta



THOMAS FUCHS (*robot*); CORTESÍA DE WIM NOORDUIN, UNIVERSIDAD HARVARD (*cristales de sílice*)

ASTROFÍSICA

El último aliento de una estrella

Dos meteoritos hallados en la Antártida parecen contener granos de sílice (el material del que se componen el cuarzo y la arena) procedente de una supernova que habría estallado antes de que se formase el sistema solar. Algunos investigadores creen que hubo de ser una explosión estelar de esa clase la que, hace miles de millones de años, desencadenó la génesis del sistema solar a partir de una nube de gas y polvo. Pero, al margen de que los meteoritos de la Antártida aporten o no información sobre semejante cataclismo, sí parecen contener el subproducto de una explosión de supernova nunca antes hallado en la Tierra.

El sílice encontrado en los meteoritos se distingue por su exótica mezcla de isótopos, «inexplicable por ninguno de los procesos conocidos que actúan en el sistema solar», según un estudio publicado el pasado mes de mayo en *Astrophysical Journal Letters*. Solo las reacciones nucleares que alimentan el interior de las estrellas podrían dar cuenta de semejante composición. En general, se cree que algunos de los materiales presolares que acabaron formando parte del sistema solar podrían haberse originado en supernovas cercanas; otros, en cambio, habrían llegado a merced de los vientos estelares de estrellas viejas.

En el nuevo estudio, Pierre Haenecour, de la Universidad de Washington en San Luis, y sus coautores analizaron dos meteoritos hallados en la Antártida en 2003. Los investigadores concluyeron que el sílice (SiO_2) que contenían debía ser anterior a la formación del sistema solar debido a su riqueza en oxígeno 18, un isótopo pesado de dicho elemento. Esa composición sugiere que se habrían formado en una supernova de tipo II, una explosión iniciada por el colapso del núcleo de una estrella de gran masa. En el pasado, otros científicos habían encontrado sílice presolar en otros meteoritos, pero con una composición isotópica que indicaba que provenían de estrellas de la rama asintótica gigante, cierta clase de estrellas envejecidas.

Analizar esa clase de compuestos constituye mucho más que un ejercicio de historia interestelar. La formación del Sol y los planetas a partir de una nube de gas y polvo pudo haberse desencadenado gracias a la onda expansiva de una supernova cercana o debido a las emisiones, más suaves, de una estrella de la rama asintótica gigante. Por tanto, el estudio de tales residuos primigenios no solo ayudará a profundizar en los violentos procesos interiores de las estrellas moribundas, sino que tal vez permita entender el evento que dio origen al Sol, la Tierra y los demás planetas.

—John Matson

PATENTES

Proteínas de telaraña: La seda ampulácea mayor constituye el tipo más resistente entre las que producen las arañas. En relación con su peso, resulta más fuerte que el Kevlar, que se utiliza en los chalecos antibalas. Sin embargo, los investigadores han hallado dificultades para integrar tal sustancia en materiales con uso práctico. La patente número 8.278.416 describe dos proteínas modificadas de telaraña y la manera de hacer que se autoensamblen. El material resultante carece de toxicidad; además, es biodegradable, fuerte y elástico, como la seda natural, afirma My Hedhammar, de la Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia y directora de I+D en Spiber Technologies, en Uppsala. Hedhammar y sus colaboradores sintetizaron las proteínas acortando la secuencia de genes identificada en las arañas e insertándola en la bacteria *Escherichia coli*. Consiguieron así que produjera grandes cantidades de las proteínas.

Las fibras obtenidas presentan una elevada resistencia y pueden ser hiladas, tejidas, retorcidas o incluso utilizadas para hacer en ganchillo un material similar a la seda. Las aplicaciones futuras podrían incluir vendas para heridas y andamiajes tisulares para la medicina regenerativa. *—Marissa Fessenden*



Hilo de araña

THOMAS FUCHS (*galaxia*); SCIENCE SOURCE (*hilo de seda*)

SALUD

Misterio mediterráneo



Los médicos y los especialistas en nutrición asocian desde hace tiempo la dieta mediterránea con beneficios para la salud, incluido un menor riesgo de sufrir la enfermedad de Alzheimer. Un estudio publicado en fecha reciente, realizado a lo largo de catorce años con 1880 personas de edad avanzada residentes en la ciudad de Nueva York, mostró que la incidencia del alzhéimer en los que habían seguido estrictamente una dieta mediterránea era entre un 32 y un 40 por ciento más reducida que en los que no habían seguido esta dieta.

El aceite de oliva virgen extra parece ser uno de los factores principales que explican esta reducción del riesgo de padecer alzhéimer. La gente que sigue una dieta mediterránea consume hasta 50 mililitros (en torno a la quinta parte de una taza) del fragante líquido verde cada día. Anteriormente, se pensaba que este beneficio provenía de la alta concentración de ácidos grasos monoinsaturados del aceite de oliva virgen extra. Pero en el año 2005, un grupo de científicos descubrió que el oleocantal, el compuesto natural del aceite causante de una sensación de quemazón picante en la parte posterior de la garganta, parecía tener un efecto reductor de la inflamación llamativamente similar al del ibuprofeno. Desde entonces, los investigadores han dirigido su atención a los posibles beneficios de esta sustancia en particular.

Algunos estudios han mostrado que el oleocantal interfiere con la característica formación de los ovillos neurofibrilares y placas de amiloide beta, que desempeñan una función clave en la devastación neurológica provocada por la enfermedad de Alzheimer. Una investigación publicada en el número digital de febrero de *ACS Chemical Neuroscience* ofrece nueva información sobre cómo actúa el compuesto. Los autores del estudio trataron cultivos de células encefálicas de ratón con diferentes concentraciones de oleocantal a lo largo de tres días. También administraron el compuesto diariamente a ratones vivos durante dos semanas, un experimento que nunca antes se había realizado. En ambos ensayos la administración de oleocantal produjo un aumento de los niveles de dos proteínas con el papel fundamental de transportar amiloide beta al exterior del cerebro así como de las enzimas que degradan el amiloide beta.

Los investigadores también introdujeron amiloide beta en el cerebro de ratones vivos. En comparación con los grupos de control, los múridos que recibieron oleocantal mostraron una mayor eficacia en la extracción y degradación del amiloide beta. «Estamos intentando comprender mejor el mecanismo del oleocantal y quizás encontrar compuestos que puedan funcionar del mismo modo para desarrollar medicamentos», afirma Amal K. Kaddoumi, de la Universidad de Luisiana, coautora en el estudio. Los resultados, señala, probablemente serán más aplicables a la prevención de la enfermedad de Alzheimer que a su tratamiento. También piensa que hay otros factores, además de un alto consumo de aceite de oliva, que explican el llamado «milagro mediterráneo», como el ejercicio y la gran cantidad de verdura fresca que se consume en esa región.

El oleocantal forma parte del grupo de sustancias con las que trabajan los científicos para extraer amiloide beta del cerebro. Otros compuestos destacados son un antiguo medicamento contra el cáncer de piel que, en un estudio del año pasado, ayudó a aliviar los síntomas del alzhéimer en ratones y anticuerpos que se unen directamente a la proteína amiloide beta y la eliminan. «Este estudio comienza a arrojar luz sobre cuáles son los componentes activos en los productos nutricéuticos», afirma Kenneth S. Kosik, profesor de la cátedra Harriman de neurociencias de la Universidad de California, en Santa Bárbara.

Kosik señala, sin embargo, que hasta que se realicen estudios clínicos en humanos conviene interpretar con cautela estos resultados. El grupo de Kaddoumi está tratando de obtener financiación que permita realizar estos ensayos.

—Rachel Nuwer

THOMAS FUCHS *(aceite)*; AURÉLIEN ALVAREZ, ÉTIENNE GHYS Y JOS LEYS/CC BY-NC-SA *(modelo matemático)*

AGENDA

CONFERENCIAS

21 de octubre
Investigación, innovación y competitividad: el caso del CSIC
Emilio Lora Tamayo, presidente del CSIC
Ciclo «Desafíos del siglo xxi»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

28 de octubre
Lecciones de seguridad aprendidas tras el accidente del reactor nuclear de Fukushima
Yotaro Hatamura, Universidad de Tokio y Comisión de investigación sobre el accidente en las centrales nucleares de Fukushima
Fundación Ramón Areces, Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

Exposición virtual
Matemáticas para el planeta Tierra
imaginary.org/exhibition/mathematics-of-planet-earth



OTROS

Del 7 al 10 de octubre - Congreso
Vacuna del SIDA 2013
Centro Internacional de Convenciones
Barcelona
www.vaccineenterprise.org/conference/2013

7 de octubre - Jornada
La teoría matemática de la comunicación
Sergio Verdú, Universidad de Princeton
Coloquio anual de la Real Sociedad Matemática Española
Facultad de Matemáticas
Universidad de Barcelona
www.rsme.es/content/view/1345/1

Del 27 al 30 de octubre - Simposio
Heterogeneidad y plasticidad tumoral
10º aniversario del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas
Auditorio de la Fundación Mutua Madrileña, Madrid
www.cnio.es

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Ruptura de simetría bajo inversión temporal

¿Por qué algunos procesos cuánticos no se desarrollan al mismo ritmo que su versión opuesta?

Hace unos meses, el laboratorio del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) y el Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC) anunciaron la observación directa de la ruptura de simetría bajo inversión temporal en las leyes físicas. El hallazgo se basó en una técnica de análisis que propusimos el año pasado junto con Pablo Villanueva Pérez, también del IFIC, y en una serie de conceptos avanzados en 1999 por Mari Carmen Bañuls, ahora en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, y uno de nosotros (Bernabéu). El estudio experimental, en el que también participamos, recibió la atención de la comunidad de física de partículas y de medios científicos internacionales. En este artículo explicaremos los detalles del experimento y la trascendencia del resultado.

La asimetría temporal observada es una de las más misteriosas y difíciles de detectar por medios directos. No guarda ninguna relación con la flecha del tiempo macroscópica, tan familiar en la vida cotidiana, sino que afecta a las leyes cuánticas que rigen el mundo microscópico. Además, se halla estrechamente ligada a una de las propiedades más enigmáticas de la naturaleza: la diferencia entre materia y antimateria.

El resultado fue obtenido a partir de un análisis de los datos acumulados entre 1999 y 2008 por el experimento BaBar, del SLAC. Este fue diseñado para estudiar la ruptura de la simetría *CP*, una sutil diferencia entre el comportamiento de algunas partículas y el de sus antipartículas. En el acelerador de Stanford se hacían colisionar electrones y positrones a energías muy elevadas con el objetivo de producir en grandes cantidades ciertas partículas conocidas como mesones *B*. Durante sus casi nueve años de servicio, el experimento BaBar registró unos quinientos millones de pares de mesones *B*.

Nuestro análisis se basó en la capacidad única de dicho experimento para producir pares entrelazados de mesones *B*. Decimos que dos partículas se hallan entrelazadas cuando sus propiedades cuánticas no son independientes entre sí. De esta manera, al medir el estado de una de ellas puede inferirse el de su compañera. Dicho método nos permitió comparar ciertas transiciones entre pares de estados de mesones *B* con sus transiciones inversas. Al hacerlo, pudimos comprobar, con una gran significación estadística (14 desviaciones estándar), que ambos procesos no eran simétricos. Los resultados aparecieron publicados en noviembre de 2012 en la revista *Physical Review Letters*.

El teorema *CPT*

Hasta los años cincuenta del siglo xx, se pensaba que las leyes físicas tenían que permanecer invariantes bajo tres transformaciones fundamentales: inversión de paridad (*P*), conjugación de carga (*C*) e inversión temporal (*T*). Imaginemos un proceso en el que varias partículas interaccionan y producen otras nuevas. Aplicar una transformación *P* a dicho proceso consiste en intercambiar las posiciones de todas las partículas por las de su reflexión especular (es decir, «izquierda» por «derecha»). Una transformación de tipo *C* sustituiría cada partícula por su correspondiente antipartícula. Por último, *T* supone «rebobinar» en el tiempo y considerar el proceso opuesto; ello implica invertir el sentido de las velocidades e intercambiar partículas iniciales y finales.

La comprensión de estas —y otras— simetrías, así como su ruptura, representa una pieza clave en la construcción del modelo estándar de la física de partículas. Hoy sabemos que las interacciones fuerte, electromagnética y gravitatoria resultan invariantes bajo esas tres transformaciones. Decimos por ello que son *simétricas* con respecto a *C*, *P* y *T*. En 1957, sin embargo, se descubrió que en algunos procesos asociados a las desintegraciones radiactivas (mediadas por la interacción débil) la simetría *P* estaba completamente rota. Es decir, mientras que algunos procesos tenían lugar, los asociados a su reflexión especular no se observaban.

En 1964, los físicos Val L. Fitch y James W. Cronin lideraron un experimento que mostraba que ciertas partículas inestables, los kaones, sufrían una minúscula pero inequívoca ruptura de la simetría combinada *CP*. Poco después se entendió que dicha asimetría resultaba necesaria para explicar el enorme desequilibrio entre las cantidades de materia y antimateria presentes en nuestro universo actual. Muchos años después, en 2001, se descubrió en BaBar y en un experimento similar en Japón, Belle, que la simetría *CP* tampoco se respetaba en la desintegración de otra clase de partículas: los mesones *B*.

Sin embargo, existe un teorema fundamental que afirma que la aplicación conjunta de *C*, *P* y *T* sí debe constituir una simetría exacta de la naturaleza. Dicho teorema es considerado una piedra angular de la física de partículas, ya que se basa en tres principios muy generales y bien establecidos: la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y la idea de que todas las interacciones se propagan por medio de campos.

El teorema *CPT* tiene varias consecuencias de primer orden. Entre ellas, que la masa y la vida media de una partícula deben ser exactamente iguales a las de su antipartícula. Además, la ruptura de la simetría *CP* requiere que la simetría *T* también esté rota, a fin de que sus efectos se compensen mutuamente. En ello radica la importancia de verificar de modo independiente la asimetría por inversión temporal: si un experimento mostrase una desviación con respecto a las predicciones del teorema *CPT*, las consecuencias serían revolucionarias.

La simetría *T* y la flecha del tiempo

La ruptura de la simetría *T* no debe confundirse con la irreversibilidad en la evolución de los sistemas físicos complejos. La habitual «flecha del tiempo» macroscópica se observaría igualmente aunque las leyes microscópicas respetasen la simetría *T*. Esa flecha temporal se debe al segundo principio de la termodinámica, el cual dicta que la entropía (una medida del desorden en un sistema físico) siempre aumenta con el tiempo.

Imaginemos un jarrón que cae al suelo y se rompe. Por más que todas las interacciones atómicas y moleculares sean invariantes bajo inversión temporal, jamás esperaríamos ver el proceso inverso, en el que los pedazos reconstruyen el jarrón original. La explicación a esta aparente paradoja la encontramos en la escasa probabilidad de obtener las condiciones iniciales

necesarias para que, al lanzar los pedazos, estos sigan las trayectorias opuestas y se unan de nuevo tras sufrir las mismas interacciones en orden inverso. Por tanto, dicha irreversibilidad se halla asociada a la existencia de un gran número de grados de libertad, no a una ruptura de la simetría *T* en las interacciones microscópicas.

Las desintegraciones de kaones o de mesones *B* no respetan la simetría *CP*. Por tanto, en dichos procesos esperaríamos ver también una ruptura de la simetría *T*. Pero, al igual que ocurre con el estallido de un jarrón, las desintegraciones de dichas partículas constituyen procesos irreversibles, lo que implica grandes dificultades para observar directamente la ruptura de simetría *T*. Además, mientras que el proceso de desintegración está mediado por la interacción débil, su inverso (la «reconstrucción» de un kaón o un mesón *B* a partir de sus restos) estaría dominado por las interacciones fuerte y electromagnética. Estas, que respetan la simetría *T*, son mucho más intensas que la primera, lo cual enmascara por completo el proceso que deseamos analizar.

En 1998, el experimento CPLEAR, del CERN, llevó a cabo un análisis con kaones neutros. Estas partículas, denotadas K^0, poseen la propiedad de que pueden transmutarse espontáneamente en su propia antipartícula, $\overline{K}^0$. Los físicos de CPLEAR midieron una diferencia entre la probabilidad de transición del proceso $K^0 \rightarrow \overline{K}^0$ y la de su inverso, $\overline{K}^0 \rightarrow K^0$, con una significación estadística cercana a cuatro desviaciones estándar. Con todo, la diferencia observada no permite distinguir por sí misma la ruptura de la simetría *T* independientemente de la ruptura de la simetría *CP*. Era preciso, pues, estudiar alguna alternativa.

Mesones *B* entrelazados

En el experimento BaBar, la energía de los electrones y los positrones se ajusta para que, al chocar, produzcan un mesón Υ (úpsilon). Dicho mesón es un estado inestable formado por un quark b y un antiquark $\bar{b}$. Una vez creado, se desintegra inmediatamente en un par de mesones *B* neutros. Al igual que los kaones, los mesones *B* neutros también «oscilan»: al propagarse, pueden mutar de identidad y convertirse en su propia antipartícula.

Consideremos el caso en que la partícula Υ se desintegra en un par formado por un mesón B^0 (compuesto por un antiquark $\bar{b}$ y un quark d) y su antipartícula, denotada $\overline{B}^0$. Una vez producidos, cada uno de ellos comenzará a oscilar. Sin embargo, dado que ambas partículas proceden de la desintegración del mismo mesón Υ, sus propiedades se encuentran entrelazadas. Ello implica que, mientras ninguna de ellas se desintegre, las correlaciones cuánticas entre una y otra se mantendrán, por lo que sus oscilaciones serán «complementarias».

Supongamos que uno de los mesones *B* se desintegra en el instante t_1. Los detectores del experimento registrarán sus productos de desintegración, gracias a lo cual se «filtra» un estado de dicho mesón en t_1 de entre todos los posibles. A su vez, esa información nos permite «etiquetar» el estado del otro miembro del par: debido al entrelazamiento, si en t_1 la partícula que se ha desintegrado ha filtrado un estado B^0, el de su compañera solo puede ser identificado como su complementario, $\overline{B}^0$. Después, esta partícula continuará oscilando y se desintegrará en un instante posterior, t_2. Una vez más, al detectar sus productos de desintegración podremos filtrar el correspondiente estado en t_2.

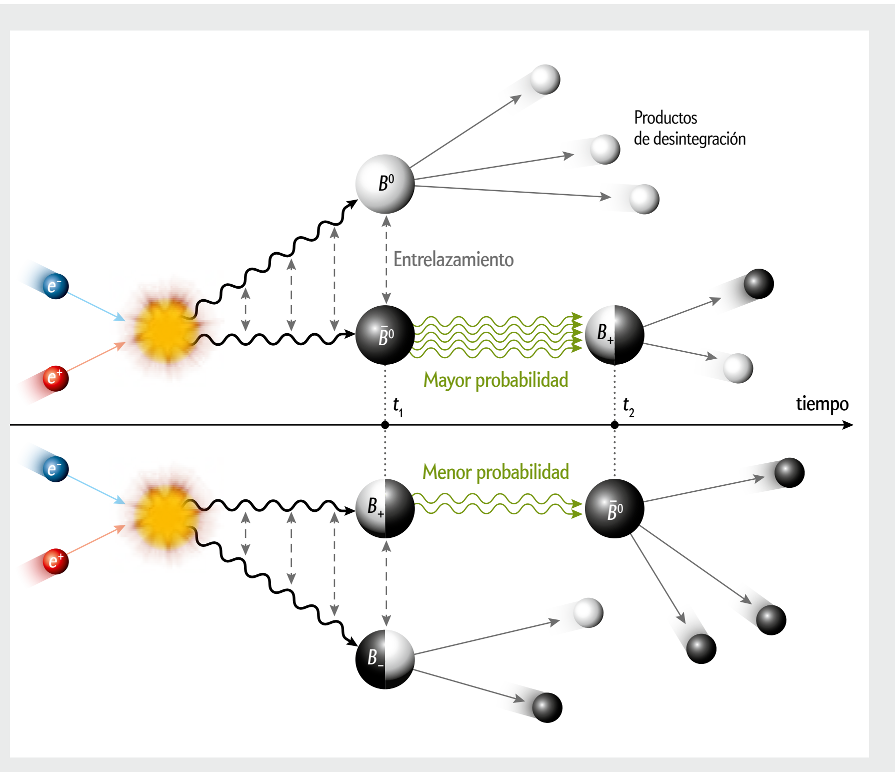
En general, una partícula cuántica queda descrita por una superposición de estados. En los procesos que estamos considerando, los estados que podemos filtrar o etiquetar no son solo los estados

INVERSIÓN TEMPORAL EN OSCILACIONES DE MESONES *B*

Los mesones *B* neutros son partículas que «oscilan»; al propagarse, su identidad fluctúa entre varios estados: B^0 (*blanco*), $\overline{B}^0$ (su antipartícula, *negro*) y dos superposiciones, B_+ (*blanco-negro*) y B_- (*negro-blanco*).

En el experimento BaBar, en Stanford, se hacían colisionar electrones (e^-) y positrones (e^+) para producir pares entrelazados de mesones *B*. Cuando un mesón *B* se desintegra, sus restos permiten «filtrar» en ese momento un estado de entre todos los posibles. Debido al entrelazamiento, esa información sirve también para «etiquetar» el estado de su compañero. Este segundo mesón continuará oscilando y se desintegrará en un instante posterior.

El «etiquetado» del segundo mesón en t_1 y su desintegración posterior en t_2 permite saber qué oscilación ha tenido lugar (en este ejemplo, $\overline{B}^0 \rightarrow B_+$). Al analizar otras colisiones, puede estudiarse la oscilación inversa ($B_+ \rightarrow \overline{B}^0$) y comparar las probabilidades de una y otra. La diferencia entre ambas indica una ruptura de la simetría por inversión temporal.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

B^0 y $\bar{B}^0$, sino también dos de sus combinaciones lineales, llamadas B_+ y B_-. Estas superposiciones se componen de los mismos quarks, pero se diferencian de los estados B^0 y $\bar{B}^0$ en sus productos de desintegración.

Los cuatro estados mencionados nos permiten estudiar ocho posibles transiciones: $\bar{B}^0 \to B_-$, $B_+ \to B^0$, $\bar{B}^0 \to B_+$, $B_- \to B^0$ y sus inversas. La asimetría bajo inversión temporal se observó al medir, para intervalos de tiempo fijos Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$), la probabilidad de cada transición y compararla con la probabilidad de la transición inversa. Ambas resultaron ser distintas. La magnitud de dicha asimetría depende, además, del tiempo de transición considerado (Δt), dado que esta se genera durante la evolución temporal entre las dos desintegraciones.

El fenómeno del entrelazamiento, uno de los más asombrosos de la mecánica cuántica, fue presentado durante largo tiempo como una paradoja (conocida como paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen) para rebatir que la mecánica cuántica fuese una teoría «completa». Sin embargo, esa no separabilidad entre las «partes» de un sistema cuántico ha sido demostrada experimentalmente, y en los últimos años su uso se ha generalizado en varios campos, como el de la información cuántica. En nuestro experimento, el entrelazamiento nos ha permitido explotar las propiedades de los mesones *B* para demostrar que sus oscilaciones no son invariantes bajo inversión temporal.

Por último, los datos muestran que la ruptura de la simetría *T* compensa a la perfección la de la simetría *CP* observada en el mismo conjunto de procesos. Ello supone una confirmación más del teorema *CPT*: la materia que evoluciona en un sentido temporal se comporta igual que la reflexión especular de la antimateria que evoluciona en sentido opuesto.

—José Bernabéu
y Fernando Martínez Vidal
Instituto de Física Corpuscular
Valencia

QUÍMICA

Betalaínas: colorantes naturales bioactivos

Debido a su carácter hidrosoluble, estabilidad y actividad antioxidante, estos pigmentos naturales están despertando el interés de la industria alimentaria

Los colorantes alimentarios vienen empleándose desde hace más de 4000 años. En la actualidad, se hallan presentes en la mayor parte de los alimentos industrializados, ya que incrementan su atractivo a ojos del consumidor. Un color estable y llamativo constituye un atributo de alto valor añadido en el competitivo mercado de las industrias elaboradoras de alimentos.

La mayoría de los colorantes alimentarios son de origen sintético. Dadas las altas dosis que llegan a ingerirse, sobre todo en edades infantiles, en los últimos años se ha fijado la atención en sus efectos sobre la salud. La Agencia de Seguridad Alimentaria de la Unión Europea recomienda minimizar el empleo de colorantes y aditivos en general, limitándolos a los casos en que exista una necesidad vinculada con la conservación, el sabor o la utilidad de los alimentos. Una investigación dirigida por Jim Stevenson, de la Universidad de Southampton, examinó los umbrales de seguridad del consumo diario de seis colorantes alimentarios sintéticos: amarillo de quinoleína (E104), amarillo anaranjado (E110), tartrazina (E102), azorrubina/carmoisina (E122), rojo allura AC (E129) y rojo ponceau 4R (E124). Los resultados, publicados en 2007 en la revista *The Lancet,* advertían sobre posibles trastornos de atención en niños debidos a la ingesta de estas sustancias. Algunas legislaciones europeas ya obligan a incluir en las etiquetas de los productos eventuales efectos adversos causados por el consumo de las mismas.

Además de las recomendaciones de las autoridades sanitarias, la industria alimentaria tiene en cuenta también el comportamiento de los consumidores, que cada vez más muestran preferencia por los productos naturales. Por todo ello (motivos de seguridad alimentaria y de estrategia comercial), en los últimos años

Betanina
Indicaxanteno
Amarantina
Vulgaxanteno I

MOLÉCULAS de cuatro de las betalaínas más comunes, dos betacianinas (*púrpura*) y dos betaxantinas (*amarillo*).

el mercado de los colorantes se ha decantado hacia los de origen natural.

Entre los pigmentos naturales destacan clorofilas, carotenoides, antocianos y betalaínas. Estos tres últimos aportan mayoritariamente las tonalidades rojizas en los colorantes alimentarios naturales (precisamente es la gama de los rojos la parte de la paleta de tonos más afectada por las restricciones en el uso de colorantes sintéticos). Carotenoides y antocianos se hallan ampliamente presentes en la naturaleza, y su empleo en la industria se halla muy extendido desde hace años. Las betalaínas son menos conocidas, probablemente por su escasez; su uso como colorante está más restringido. No obstante, constituyen una opción cada vez más interesante para la industria alimentaria. Veamos por qué.

Higo chumbo y remolacha

El interés científico en las betalaínas nació en la segunda mitad del siglo xx. Las primeras publicaciones sobre estos pigmentos se deben a H. Wyler (1963) y M. Piatelli (1964), quienes determinaron la estructura química de la betanina y el indicaxanteno, respectivamente. Sin embargo, hasta hace pocos años no se han retomado las investigaciones sobre estas moléculas. Químicamente son alcaloides derivados de la tirosina. Se dividen en betacianinas (rojo-púrpura) y betaxantinas (amarillo-naranja). Las betacianinas se forman por condensación del ácido betalámico con un residuo de *ciclo*-dihidroxifenilalanina (*ciclo*-DOPA); las betaxantinas poseen aminoácidos o aminas adicionadas en dicha posición [*véase* «Flores fluorescentes», por F. García Carmona, G. Gandía Herrero y J. Escribano; Investigación y Ciencia, abril de 2011].

Desde 2004, el empleo de betalaínas como colorantes alimentarios está autorizado por la Comisión del *Codex Alimentarius*, el código de normas alimentarias que elaboran la OMS y la FAO. Se comercializan tanto en EE.UU. como en la Unión Europea con el nombre de rojo remolacha, cuyo pigmento mayoritario es la betanina (betanidina-5-*O*-β-glucósido).

En el reino vegetal, las betalaínas se hallan sobre todo en las plantas del orden Cariofilales, en el cual Chenopodiaceae, Cactaceae, Amaranthaceae, Aizoaceae, Nyctaginaceae y Portulacaceae son las familias más conocidas.

En la naturaleza suelen encontrarse glicosiladas, predominando la betanina y su isómero, la isobetanina. Entre las betaxantinas más importantes destacan el vulgaxanteno I (glutamina-betaxantina), mayoritario en la remolacha (*Beta vulgaris*), y el indicaxanteno (prolina-betaxantina), abundante en el higo chumbo (*Opuntia ficus indica*).

De pigmento a colorante

La disponibilidad de preparados comerciales de betalaínas se restringe a concentrados de extracto líquido de remolacha (entre el 60 y el 65 por ciento de sólidos totales) obtenidos por evaporación rotativa de extracto fresco, o al sólido (entre el 0,3 y el 1 por ciento de betanina) producido por atomización o liofilización del líquido concentrado.

El extracto de remolacha se obtiene tras el blanqueado (inactivación de enzimas que puedan degradar el color), troceado, prensado y posterior filtración de las raíces de remolacha. Los preparados comerciales no son puros; difieren en su color según la proporción de betacianinas y betaxantinas. Con frecuencia presentan olores característicos, debidos a la presencia de geosmina y pirazinas, que pueden desmerecer su calidad. El rendimiento de la extracción llega a los 0,5 gramos por kilogramo fresco de raíz procesada. Se trata de un colorante potente: bastan dosis inferiores a los 50 miligramos de betanina por kilogramo de producto final para obtener el tono de color deseado.

Los frutos de *Opuntia* pueden también emplearse como fuente de betalaínas, ya que desde el punto de vista organoléptico son mejores que la remolacha, además de ser más amplia la gama de colores que aportan. En 2012 nuestro grupo de investigación publicó en *Food Technology and Biotechnology* un proceso para la extracción de betaxantinas de frutos de *Opuntia*, basado en la evaporación rotativa a baja presión; permite obtener un extracto amarillo, de indicaxanteno, con una concentración de 0,27 gramos por litro. En especies como *O. stricta*, el rendimiento en la producción de pigmentos supera los 0,5 gramos de betanina por kilogramo de fruto fresco.

Los colorantes amarillos naturales disponibles en el mercado son lipofílicos; las betaxantinas, en cambio, son hidrosolubles, lo que facilita su dispersión en el alimento y una coloración más uniforme del mismo.

Aplicaciones industriales

Un requisito que debe cumplir todo pigmento para convertirse en colorante es ser estable: por un lado, frente a los pro-

cesos industriales de elaboración de los alimentos; por otro, frente a las condiciones de *p*H y la interacción con otros constituyentes.

La estabilidad de las betalaínas depende del *p*H, la luz, el oxígeno y la temperatura. En cuanto al *p*H, se muestran estables en un ancho rango de valores (entre 3 y 7), lo que las hace especialmente aptas para ser empleadas en un amplio espectro de alimentos de acidez baja y neutra, donde no pueden usarse antocianos. Se degradan en presencia de luz si la atmósfera es aeróbica. En condiciones anaeróbicas, su oxidación es insignificante; al oxidarse adquieren tonalidades pardas, lo que puede evitarse en atmósferas modificadas y en presencia de antioxidantes como el ácido ascórbico. La termolabilidad es el factor que más restringe el empleo de las betalaínas como colorantes alimentarios: temperaturas superiores a 35 ºC aceleran su degradación originando como productos el ácido betalámico (incoloro) y otros compuestos de tonos pardos.

El colorante derivado de las betalaínas (E162) se puede emplear en batidos, yogures, helados, gelatinas, cremas, jamón cocido, bebidas refrescantes de frutas, golosinas y productos de confitería.

Principales especies vegetales productoras de betalaínas

FAMILIA	ESPECIE	BETALAÍNAS	
		BETACIANINAS	BETAXANTINAS
Chenopodiaceae	*Beta vulgaris*	Betanina Isobetanina	Vulgaxanteno I Vulgaxanteno II Indicaxanteno
	Chenopodium rubrum	Betanina Celosianina	Vulgaxanteno I Vulgaxanteno II
Cactaceae	*Opuntia ficus-indica*	Betanina Isobetanina	Indicaxanteno
	Hylocereus polyrhizus	Betanina Isobetanina Phyllocactina Hylocerenina	
Amaranthaceae	*Amaranthus* sp.	Amarantina Isoamarantina	Dopaxanteno Vulgaxanteno I Indicaxanteno Miraxanteno V
Aizoaceae	*Lamprantus productus*	Betanidina	Dopaxanteno
Nyctaginaceae	*Bougainvillea* sp.	Gomfrenina I Bougainvilleina V Ésteres cumáricos de la betanina	Dopaxanteno Muscaaurina VII
Portulacaceae	*Portulaca grandiflora*		Dopaxanteno Vulgaxanteno I Portulacaxanteno II Miraxanteno V Indicaxanteno

Este carácter hidrosoluble y estable dota a las betalaínas de una clara ventaja técnica frente a otros pigmentos naturales como los carotenoides (hidrofóbicos), puesto que facilita su uso y dosificación. Pero estas no son las únicas virtudes de estos compuestos. Destacan también por su bioactividad.

Actividad antioxidante

La estructura catiónica de las betalaínas, con una amina cuaternaria formando parte de un sistema conjugado de dobles enlaces, le confiere una gran actividad reductora (antioxidante). La presencia de estructuras fenólicas aumenta su carácter nucleófilo y las convierte en excelentes donantes de electrones y neutralizadores de radicales libres.

Existe abundante bibliografía sobre la actividad biológica de betacianinas y betaxantinas, en particular sobre su actividad antirradical y antioxidante. Se ha comprobado en humanos que, tanto la betanina como el indicaxanteno, aun siendo moléculas hidrófilas, se asocian a lipoproteínas de baja densidad (LDL), aumentando su resistencia a la oxidación. También se ha demostrado que estos pigmentos se unen a los eritrocitos, evitando su hemolisis oxidativa. Asimismo, experimentos in vitro han revelado que la betanina y la betanidina inhiben la peroxidación de lípidos.

Además de proporcionar un color atractivo a un alimento, parece, pues, que las betalaínas resultan beneficiosas para nuestro organismo.

—José A. Fernández López
Pedro J. Giménez
Departamento de ingeniería química y ambiental
Universidad Politécnica de Cartagena
Murcia

CONSERVACIÓN

Los anfibios y la contaminación química

Ciertos compuestos podrían estar contribuyendo al declive global de estos vertebrados mediante la alteración de su crecimiento, desarrollo y supervivencia

La emisión al medio natural de metales pesados, contaminantes orgánicos, pesticidas y otras sustancias tóxicas ha contribuido a modificar los ciclos del nitrógeno, el carbono, el fósforo y el agua. Al propio tiempo, estas sustancias presentan una potente actividad biológica que afecta a las especies vulnerables. La contaminación química constituye, pues, una de las principales amenazas actuales para la biodiversidad. Ello es cierto también para los anfibios, considerados el grupo de vertebrados más amenazado.

En el año 2000, Jeff. E. Houlahan, del Instituto de Biología Ottawa-Carleton de la Universidad de Ottawa, y sus colaboradores publicaron en *Nature* un trabajo que demostraba la regresión de 936 poblaciones de anfibios de todo el mundo durante las últimas décadas. En 2010, un estudio publicado en *Science,* dirigido por Michael Hoffmann, de la Comisión de supervivencia de especies de la Unión Internacional para la Con-

servación de la Naturaleza (IUCN), constató la evolución negativa del estatus de conservación de numerosas especies. La investigación se centró en datos correspondientes a 25.780 especies de la Lista Roja de la IUCN. En principio, una quinta parte de estas pertenecía a la categoría «Amenazadas». Sin embargo, detectaron que esta proporción iba en aumento: en promedio, 52 especies de mamíferos, aves y anfibios ascendían cada año una posición en la clasificación hacia la extinción —y eso a pesar de los esfuerzos de conservación.

Ante la gravedad de la situación, en las últimas décadas ha aumentado notablemente el número de investigaciones acerca del impacto de diversos compuestos sobre los anfibios. Estos estudios han revelado que los contaminantes producen efectos letales en este grupo de vertebrados, así como una gran variedad de efectos subletales, es decir, cambios que alteran los procesos fisiológicos, de crecimiento, desarrollo o comportamiento, pero que no conducen a la muerte. Por ejemplo, se ha observado que la exposición de larvas de la rana común (*Pelophylax perezi*) a compuestos nitrogenados puede incrementar la mortalidad larvaria o el número de ejemplares malformados, reducir su tamaño, acelerar el desarrollo embrionario o conducir a cambios en los niveles de actividad.

A pesar de haber detectado esas alteraciones, la magnitud de las mismas varía de un trabajo a otro en función del contexto experimental, el estadio de desarrollo, la población, la especie y otros condicionantes. Por tanto, se hace necesario realizar una labor de síntesis que proporcione una estimación del efecto global de la contaminación química en los anfibios, para determinar el papel que está desempeñando en su declive generalizado.

Se han publicado varias revisiones centradas en esa cuestión. Todas constatan que la contaminación representa una importante amenaza para este grupo. Sin embargo, las metodologías empleadas adolecen de un bajo poder estadístico, lo que limita las posibilidades de encontrar una relación causal entre los agentes contaminantes y el declive de los anfibios. Por otra parte, los estudios basados en concentraciones letales de contaminantes arrojan conclusiones poco realistas, ya que se basan en experimentos llevados a cabo en el laboratorio, donde estas concentraciones son netamente superiores a las observadas en la naturaleza.



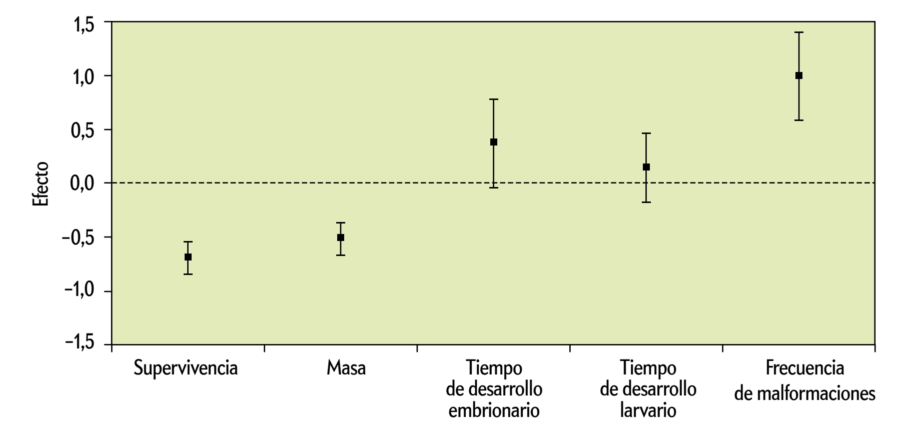
EL VERTIDO DE AGUAS DE DESECHO constituye una de las principales fuentes de contaminación química, que contribuye a una drástica disminución de la viabilidad de anfibios en fase embrionaria, larvaria o terrestre. La fotografía corresponde a un curso de agua contaminado de la cuenca del río Segura (Murcia).

ANDRÉS EGEA SERRANO

Metanálisis

Ante tal dispersión de resultados, los autores han llevado a cabo, junto con Mar Torralva, de la Universidad de Murcia, una nueva síntesis cuantitativa. A través de un metanálisis, han integrado de manera estructurada y sistemática los estudios relacionados con el impacto de la contaminación química sobre los anfibios. Para ello, han cuantificado el impacto de diversos compuestos sobre diferentes parámetros del ciclo biológico de estos vertebrados, especialmente en su fase más sensible (embrionaria y larvaria); al propio tiempo, han analizado las diferencias entre estadios de desarrollo (embriones, larvas o individuos postmetamórficos), condiciones experimentales (laboratorio, mesocosmos, corrales en el campo o individuos capturados en el campo), tipos de contaminante (compuestos nitrogenados y fosfatados, pesticidas, sales descongelantes o contaminantes presentes en aguas residuales) y familia de anfibios.

A tenor de los resultados del metanálisis, publicados en 2012 en *Ecology and Evolution*, los contaminantes químicos suelen perjudicar a los anfibios mediante tres efectos: reducen la supervivencia de los individuos expuestos, disminuyen su crecimiento y aumentan la frecuencia de



EFECTO DE LOS CONTAMINANTES (media e intervalo de confianza del 95 por ciento) en la supervivencia, la masa, el tiempo de desarrollo embrionario, el tiempo de desarrollo larvario y la frecuencia de malformaciones de los anfibios. Cuanto mayor es el valor absoluto del efecto, mayor el impacto del contaminante sobre la variable estudiada. Dado que se consideró como control la ausencia de contaminantes, un efecto negativo indica una reducción en la variable debida a la exposición a aquellos; un efecto positivo corresponde a un aumento de la variable causado por la contaminación. (Las medias con intervalos de confianza que incluyen el valor 0 no son estadísticamente significativas.)

aparición de malformaciones. Si bien su impacto se produce a escala individual, estos efectos pueden entrañar consecuencias demográficas negativas al disminuir la incorporación de nuevos individuos a las poblaciones de anfibios (reclutamiento).

Por otro lado, el análisis muestra que el impacto de los contaminantes no es uniforme. Se observa una notable variación en sus efectos en función del estadio de desarrollo, condición experimental o tipo de tóxico. Ello no resulta del todo sorprendente, ya que la gran variedad de compuestos químicos empleados por el hombre implica una enorme diversidad de mecanismos de acción y, por tanto, de efectos sobre los anfibios. Por otra parte, la sensibilidad de un individuo a los contaminantes puede variar a lo largo de su vida y en función del contexto experimental, ya que la exposición en el laboratorio implica un entorno muy controlado, que no se encuentra en condiciones más naturales.

En cuanto a la posible interacción entre contaminantes y otros agentes estresantes, si bien en algunos estudios se ha observado cierta acción conjunta, a escala global esta no ejerce un efecto relevante sobre la supervivencia de los anfibios.

A modo de conclusión, el trabajo señala la necesidad de llevar a cabo más estudios sobre dicha interacción —sobre todo en contextos realistas— e investigaciones basadas en aproximaciones que integren aspectos fisiológicos, demográficos y de comunidad. Solo así podrá determinarse el impacto real de la contaminación química en las poblaciones de anfibios.

—Andrés Egea Serrano
Dpto. de ciencias biológicas
Universidad estatal de Santa Cruz
Brasil
—Rick A. Relyea
Dpto. de ciencias biológicas
Universidad de Pittsburgh
—Miguel Tejedo
Dpto. de ecología evolutiva
Estación Biológica de Doñana-CSIC

MEDICINA

Origen fetal de las enfermedades

La desnutrición durante el período embrionario aumenta el riesgo de ciertas dolencias en la edad adulta

Al final de la Segunda Guerra Mundial, antes de la liberación definitiva de Holanda, el ejército alemán sometió las áreas del oeste del país a un embargo de víveres y combustible. En consecuencia, la población civil de ciudades tan pobladas como Ámsterdam, Rótterdam o La Haya sufrió una hambruna aguda durante un período de unos ocho meses (desde septiembre de 1944 hasta mayo de 1945), conocido como el «Invierno del Hambre». El consumo de calorías cayó más de un 50 por ciento con respecto al habitual, y se estima que más de 19.000 personas fallecieron directa o indirectamente a causa de la escasez de alimentos. Ahora bien, los efectos de la desnutrición se extendieron más allá de aquellos que la padecieron en primera persona. En particular, tuvo consecuencias nefastas para los hijos de las mujeres que se encontraban embarazadas durante ese episodio histórico.

Los bebés expuestos a desnutrición *in utero* en aquel invierno nacieron con un peso inferior (infrapeso) a la media poblacional, de 2,5 kilogramos. Pero lo más sorprendente fue que, cuando este grupo de individuos alcanzó la edad madura (entre los 40 y 50 años), se observó en ellos un aumento de la prevalencia de enfermedades crónicas, como la obesidad o la diabetes. En fecha más reciente, se ha comprobado también que tendieron a sufrir más enfermedades cardiovasculares, esquizofrenia, trastornos afectivos y riesgo de cáncer de mama en mujeres. Así pues, la malnutrición durante períodos críticos del desarrollo puede tener consecuencias permanentes y aumentar el riesgo de dolencias crónicas varias décadas más tarde. (Como curiosidad, la actriz anglo-belga Audrey Hepburn pasó parte de su infancia en la ciudad de Arnhem durante el período de la hambruna. En su biografía se relata que siempre padeció anemia, trastornos respiratorios y, más tarde, depresión. Parte de esos problemas clínicos se atribuyen a la malnutrición que sufrió durante la infancia.)

Los datos de esas observaciones en Holanda se recogen en varios estudios. Por otro lado, en nuestro país, una investigación publicada en 2006 en la *Gaceta Sanitaria* por Laura I. González Zapata, hoy en la Universidad de Antioquia, y sus colaboradores, relaciona la hambruna sufrida durante la Guerra Civil española con un aumento de la mortalidad a causa de problemas cardiovasculares.

Todas esas pruebas han ayudado a consolidar lo que se conoce como la «hipótesis del origen fetal de las enfermedades del adulto». Esta propone que diversos factores ambientales, entre los que destacan la nutrición, el estrés, las infecciones o diversos contaminantes químicos, provocan adaptaciones permanentes en el feto que, a la larga, acaban resultando perjudiciales.

La hipótesis reviste especial interés si se tiene en cuenta que la prevalencia mundial de infrapeso al nacer, según un cálculo publicado por UNICEF en 2006, alcanza el 17 por ciento, el doble que la de los países desarrollados (en España ese valor es del 7,8 por ciento).

Previsiones erróneas

¿Por qué los individuos sometidos a malnutrición *in utero* sufren un riesgo mayor de padecer diabetes? Se ha propuesto que ello se debe a un desajuste entre el ambiente nutricional durante el desarrollo y el existente durante la etapa adulta. El concepto de desajuste es fácil de entender por analogía con la previsión del tiempo meteorológico. Imaginemos que queremos pasar un día en la montaña y la previsión meteorológica anuncia un día soleado y caluroso. Por consiguiente, nos equipamos con ropa ligera, crema solar, etcétera. En cambio, al llegar a la cima de la montaña nos encontramos con un día lluvioso y frío. Este error en la previsión del tiempo, de consecuencias nefastas, ha provocado un desajuste entre la meteorología real y nuestro equipo de montaña.

De igual modo, un feto (humano, o de cualquier otro mamífero) no se halla totalmente aislado del medio externo. A través de la placenta comprueba de forma continua las condiciones ambientales existentes para adaptarlas a su metabolismo y maximizar su supervivencia al nacer. De este modo, cuando se somete un feto a malnutrición, este reprograma

su metabolismo con dos objetivos: primero, para sobrevivir de forma inmediata a la escasez de nutrientes; y segundo, para tener una mejor adaptación al medio en el que vivirá como adulto y aumentar así la supervivencia.

Cuando el individuo con infrapeso nace en una sociedad como la nuestra, donde la disponibilidad de calorías resulta ilimitada, se produce un desajuste entre los ambientes intrauterino y extrauterino. En particular, los bebés que nacen con infrapeso son muy eficientes almacenando energía en el tejido adiposo, probablemente como estrategia de supervivencia en períodos de carestía. El resultado es un incremento de la masa grasa y, en consecuencia, de aquellas enfermedades asociadas a la obesidad, como la diabetes y los problemas cardiovasculares.

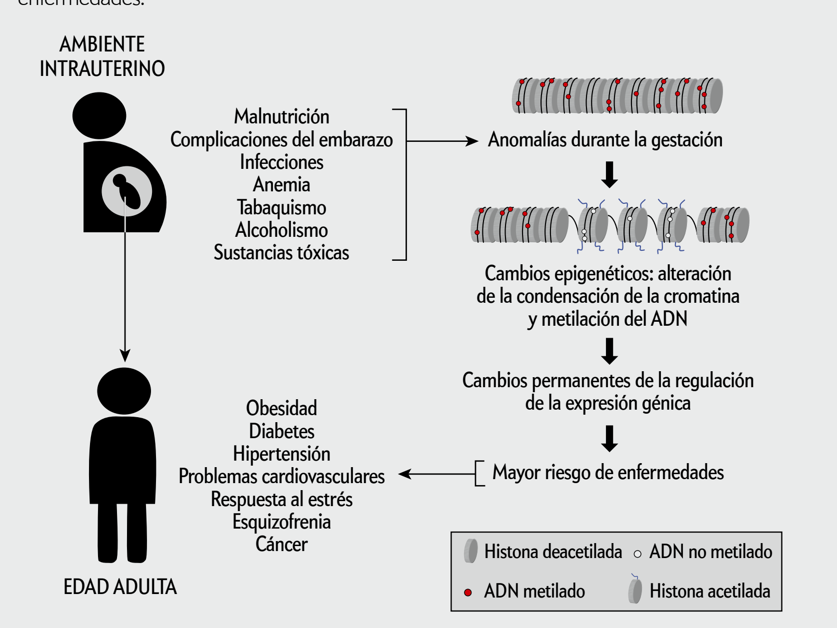
¿Cómo se traduce este desajuste a escala molecular? A lo largo de los últimos cinco años se ha propuesto que los mecanismos epigenéticos pueden explicar, en parte, la regulación a muy largo plazo de genes específicos. La epigenética analiza los cambios en la expresión de los genes, mediante la metilación de ADN y reestructuración de la cromatina, que no alteran la secuencia de ADN. Dos aspectos hacen que las modificaciones epigenéticas sean particularmente relevantes en el contexto de la hipótesis del origen fetal: en primer lugar, se producen sobre todo durante el desarrollo embrionario. En segundo lugar, una vez establecidas, resultan muy estables y suelen mantenerse a lo largo de la vida de un individuo. Ello explicaría por qué un acontecimiento sucedido en la etapa fetal presenta manifestaciones fisiológicas durante la etapa adulta.

En resumen, la hipótesis del origen fetal de las enfermedades constituye un cambio de paradigma en la manera de entender (y tratar) algunas dolencias, ya que propone que los trastornos crónicos, tradicionalmente asociados a la edad avanzada, pueden tener su origen en la edad pediátrica. Dice el refranero popular que «bien está lo que bien acaba». Pero la hipótesis en cuestión demuestra que, por lo que respecta a la salud, «bien está lo que bien empieza».

—Josep C. Jiménez Chillarón
Hospital Infantil San Juan de Dios
Fundación para la Investigación
San Juan de Dios, Barcelona

DESAJUSTE MOLECULAR

Si la mujer sufre anomalías graves durante la gestación, el ADN del feto experimenta una serie de modificaciones epigenéticas. Las alteraciones afectan a la expresión de los genes y permanecen hasta la edad adulta, momento en que favorecerán la aparición de ciertas enfermedades.



GENÉTICA DE POBLACIONES

El impacto del mestizaje en México

La población mexicana actual presenta diferencias regionales en cuanto a su origen europeo e indígena, así como en su herencia paterna y materna

Según criterios lingüísticos, la población mexicana actual puede clasificarse en dos grandes grupos: el de los indígenas, que han mantenido viva su lengua y gran parte de sus costumbres prehispánicas, y el de los mestizos, hispanohablantes procedentes de la mezcla entre europeos (sobre todo españoles), indígenas y, en menor medida, africanos que fueron traídos en calidad de esclavos poco después de la conquista, hace alrededor de 500 años.

El mestizaje en México comenzó en 1519 cuando los españoles llegaron al sudeste del país y crearon el primer ayuntamiento en la colonia Villa Rica de la Vera Cruz. Eventos subsiguientes incluyeron la conquista de dos grandes grupos de esa época, los mayas en el sur y los aztecas en el centro. En este proceso, los conquistadores ampliaron su dominio sometiendo sexualmente a las mujeres indígenas y esclavizando a hombres, mujeres y niños, mientras viajaban en busca de las «Siete Ciudades de Oro», que se presumía existían en el norte. Cuando el número de nativos disminuyó de forma notable, se importaron esclavos de la costa occidental de África, principalmente. Si bien en 1570 la proporción de mestizos en México era mínima (menos del 0,5 %), en 1810 ya alcanzaba el 40 %; según criterios lingüísticos, ahora constituyen la población predominante (alrededor del 93 %) a lo largo del territorio mexicano.

El genoma nuclear mestizo

El origen de un individuo puede ser dilucidado mediante el análisis de cambios o mutaciones acumuladas en su ADN, ya que este constituye un registro evolutivo de nuestra historia y relaciones genéticas.



DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA de los componentes predominantes en el genoma de la población mestiza mexicana.

El ADN se concentra mayormente en el núcleo de las células (de ahí que se denomine genoma nuclear) y es «doble», puesto que recibimos una copia del mismo de cada uno de nuestros progenitores.

En el año 2009, un par de estudios llevados a cabo en poblaciones mestizas analizaron distintos marcadores del genoma nuclear. Uno de ellos, llevado a cabo por Irma Silva Zolezzi y sus colaboradores, del mexicano Instituto Nacional de Medicina Genómica, y publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, se basó en el análisis de polimorfismos de un nucleótido (SNP, variaciones genómicas que afectan a solo un nucleótido). El otro, dirigido por Rodrigo Rubi Castellanos, de la Universidad de Guadalajara, y en el que participaron los autores de este artículo, se publicó en *American Journal of Physical Anthropology* y se centró en microsatélites (STR, de *short tandem repeat*), secuencias de ADN en las que un fragmento se repite de forma consecutiva o en tándem (en este caso, es la variación en el número de repeticiones lo que crea los distintos alelos).

Los resultados de ambos trabajos coincidieron en describir variaciones en la distribución de los orígenes europeo, indígena y africano a lo largo del territorio mexicano (*véase la ilustración*): hacia el norte y el oeste se incrementa de forma gradual el componente europeo; el indígena, en cambio, aumenta hacia el centro y sudeste, y el africano presenta una frecuencia muy inferior y más constante. Cabe señalar que dicha distribución refleja la densidad poblacional indígena en Mesoamérica, también denominada demografía prehispánica.

¿Herencia paterna o materna?

Otro enfoque en los estudios de genética de poblaciones se basa en el uso de marcadores moleculares en el cromosoma Y (CY), el cual determina una herencia paterna exclusiva de padres a hijos varones, y en el ADN mitocondrial (ADNmt), un orgánulo celular que sintetiza gran cantidad de energía química y que heredan exclusivamente de la madre todos los hijos de ambos sexos. A diferencia del genoma nuclear, que mezcla el material genético del padre y la madre en cada generación, el CY y el ADNmt conservan el linaje paterno y materno, respectivamente: el cromosoma Y es igual al del padre, al del abuelo y al de los demás ancestros varones vía paterna; el ADNmt es el mismo que poseen nuestra madre, nuestra abuela, y los demás ancestros femeninos vía materna. Sin embargo, con el paso de las generaciones se van acumulado mutaciones que caracterizan tanto al CY como al ADNmt, las cuales operan a modo de marcadores genéticos que permiten establecer linajes paternos y maternos, respectivamente, útiles para la caracterización humana a diferentes niveles: individuos, familias, poblaciones, continentes y especies.

En colaboración con el Centro de Medicina Genómica del Hospital General de Culiacán, el Grupo de Inmunogenética Funcional del Centro Universitario de Ciencias de la Salud de Guadalajara y la Unidad Académica de Ciencias Químicobiológicas de la Universidad Autónoma de Guerrero, hemos llevado a cabo un estudio de linajes paternos a través del CY y maternos a partir del ADNmt en la población mestiza mexicana. Para ello analizamos en diez poblaciones mestizas distribuidas a lo largo del territorio mexicano distintos marcadores clave que permiten determinar si un CY o un ADNmt tiene un origen europeo, indígena o africano.

Los resultados, publicados en línea en julio de 2012 en *Journal of Human Genetics* para el CY y en junio de 2013 en *American Journal of Physical Anthropology* para el ADNmt, muestran que en la vía paterna predomina el origen europeo (64,9 %), mientras que en la materna prevalece el origen indígena (92,9 %). Ello guarda relación con los registros históricos de la conquista, que fue realizada principalmente por varones españoles (CY) que se reprodujeron con mujeres indígenas (ADNmt), ya que las mujeres europeas llegaron tiempo después y en menor cantidad. A este fenómeno se le conoce como flujo génico diferencial o mestizaje asimétrico, y se ha observado en varias poblaciones latinoamericanas donde suele predominar el origen africano (El Caribe) o el europeo (Sudamérica).

Cabe recordar que el genoma paterno (CY) presenta un patrón similar al descrito en el genoma nuclear, ya que el origen europeo aumenta de forma gradual hacia el oeste y el norte de México, mientras que el indígena (segundo en frecuencia global, 30,8 %) lo hace en el centro y el sudeste. El origen africano paterno se detectó solo en el 4,2 % de la población, con una distribución bastante homogénea a lo largo del país. Por el contrario, en el genoma materno (ADNmt) predominó el componente indígena (92,9 %); el europeo constituyó solo el 5,3 %, con ligeros incrementos hacia el norte y el oeste, y una presencia menor o nula en el centro y el sudeste; el componente africano materno es raro (1,9 %) pero homogéneo entre poblaciones mestizas.

Se concluye, pues, que la mayoría de los mestizos tienen «abuelos españoles» y «abuelas indígenas», sobre todo hacia el oeste y norte de México. Este conocimiento reviste importancia para estudiar y predecir la prevalencia de enfermedades donde existan factores genéticos de riesgo (o protección), lo que en un futuro facilitaría a las autoridades sanitarias el diseño de mejores medidas de prevención.

—Gabriela Martínez Cortes
y Héctor Rangel Villalobos
Instituto de Investigación
en Genética Molecular
Universidad de Guadalajara
México

Giulio Tononi y **Chiara Cirelli** son profesores de psiquiatría en la Universidad de Wisconsin-Madison. Sus trabajos acerca de la función del sueño forman parte de un proyecto de investigación más amplio sobre la consciencia humana, tema del reciente libro de Tononi *Phi: A voyage from the brain to the soul* (Pantheon, 2012).



NEUROCIENCIA

Los beneficios del sueño

Cuando dormimos se debilitan las conexiones entre nuestras neuronas. Al parecer, ello reduce el consumo de energía y, paradójicamente, ayuda a la memoria

Giulio Tononi y Chiara Cirelli

Cada noche, mientras yacemos dormidos, ciegos, mudos e inmóviles, nuestro cerebro sigue trabajando. Las neuronas emiten casi tantos impulsos como cuando estamos conscientes, y consumen casi la misma energía ¿Qué significa esta incesante actividad durante el descanso? ¿Por qué la mente se desconecta por completo del entorno mientras el cerebro se mantiene ocupado?

La actividad cerebral durante el reposo parece desempeñar una función esencial. Una de las pruebas de la importancia del sueño es su ubicuidad. A pesar de que permanecer inconsciente y sin capacidad de reaccionar aumenta el riesgo de convertirse en presa de un tercero, todos los animales duermen. Lo hacen las aves, las abejas, las iguanas y las cucarachas, incluso las moscas de la fruta, según demostramos nosotros y otros autores hace más de una década.

EN SÍNTESIS

Dado que todos los animales duermen, el sueño debe de desempeñar una función vital.

Existen datos que sugieren que el sueño debilita las conexiones entre las neuronas, lo que resulta sorprendente, dado que la memoria y el aprendizaje se basan en el refuerzo de esas uniones durante el estado consciente.

Pero al atenuar las sinapsis, el sueño evitaría que las neuronas se sobresaturasen con la experiencia diaria y reduciría su consumo energético.

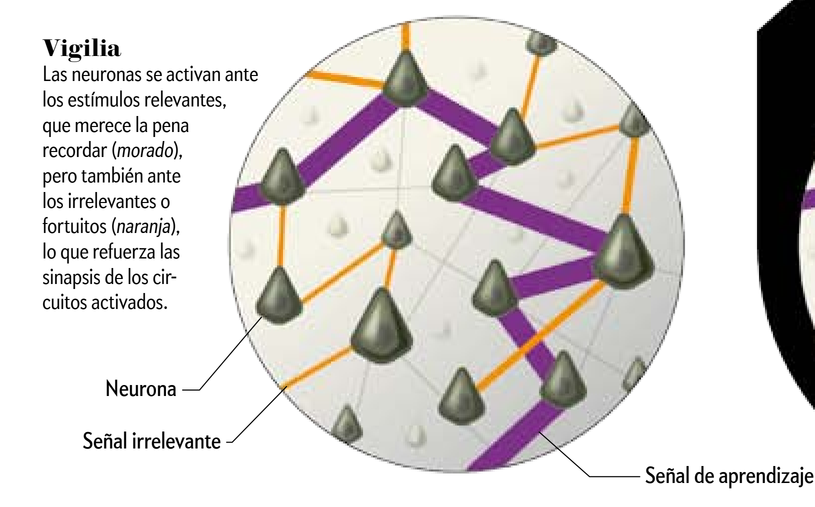
FOTOGRAFÍA DE FREDRIK BRODEN



NUEVA HIPÓTESIS

¿Por qué dormimos?

Durante la vigilia, los recuerdos se forman cuando las neuronas que se activan a la vez refuerzan sus conexiones (*abajo, izquierda*). Los investigadores han supuesto que, mientras dormimos, la reactivación de esos circuitos nerviosos fortalece la conexión. Pero podría suceder justo lo contrario (*derecha*): cada vez hay más pruebas de que los impulsos espontáneos durante el sueño debilitarían las sinapsis, o puntos de contacto, entre las neuronas de numerosos circuitos excitados. Los autores proponen que este debilitamiento devolvería a las sinapsis a un nivel basal, lo que ahorraría energía y reduciría el estrés de las células nerviosas. Esta vuelta al nivel basal, llamada homeostasis sináptica, constituiría el objetivo fundamental del sueño.



Vigilia
Las neuronas se activan ante los estímulos relevantes, que merece la pena recordar (*morado*), pero también ante los irrelevantes o fortuitos (*naranja*), lo que refuerza las sinapsis de los circuitos activados.

Sueño
Los impulsos espontáneos eliminan o debilitan de manera selectiva (*líneas más finas*) las conexiones neurales. De algún modo, las uniones irrelevantes se atenúan más que las relevantes, lo que mantiene inalterados los recuerdos importantes.

JEN CHRISTIANSEN

Además, la evolución ha concebido algunas adaptaciones extraordinarias para acomodarse al sueño. De este modo, los delfines y otros animales marinos que deben subir a menudo a la superficie para respirar duermen desactivando de forma alterna un hemisferio cerebral y manteniendo el otro consciente.

Durante mucho tiempo nos hemos preguntado, igual que otros, qué beneficios aporta el sueño, vista su importancia para los seres vivos. Hace más de veinte años, cuando trabajábamos juntos en la Escuela de Estudios Avanzados Santa Ana, en Pisa, comenzamos a sospechar que la actividad cerebral durante el letargo restablecería de alguna manera el nivel basal de miles de millones de conexiones neurales, el cual se modifica cada día durante la vigilia. De esta forma, el sueño contribuiría a que el cerebro siguiera formando nuevos recuerdos a lo largo de nuestra vida sin que con ello se sobresaturase o eliminase los recuerdos más antiguos.

También tenemos una idea de por qué la mente debe desconectarse del mundo exterior cuando dormimos. Creemos que la experiencia consciente del aquí y el ahora debe ser interrumpida para que el cerebro tenga la oportunidad de integrar los nuevos y los viejos recuerdos; el sueño permite ese respiro.

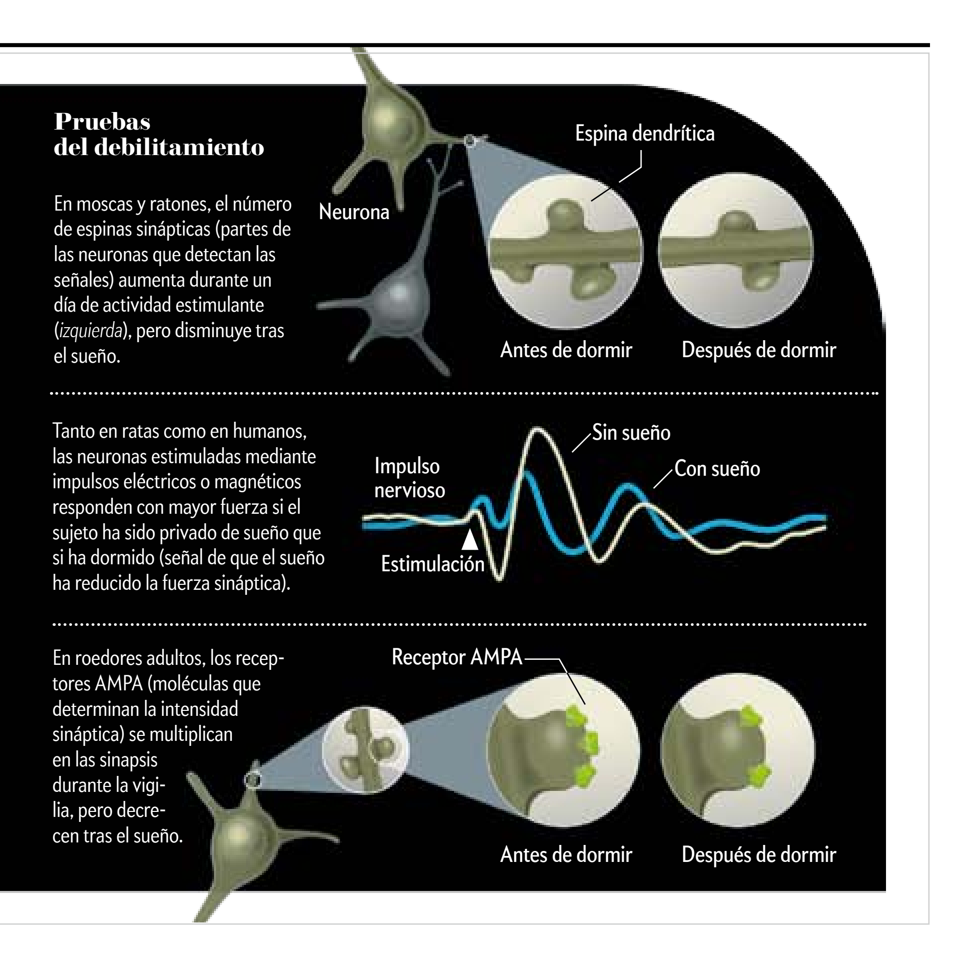
Nuestra propuesta provoca controversia entre los colegas que estudian el papel del sueño en el aprendizaje y la memoria, dado que sugerimos que la vuelta al nivel basal se debe a una debilitación de las conexiones entre neuronas que emiten impulsos durante el sueño. Tradicionalmente se ha pensado que la actividad cerebral durante el descanso «fortalece» las conexiones implicadas en el almacenamiento de los recuerdos recientes. Sin embargo, nuestras hipótesis se sustentan en años de investigación en distintos organismos, desde moscas hasta personas.

DORMIR PARA APRENDER

La idea de que el descanso es importante para la memoria fue propuesta hace casi un siglo. Desde entonces, numerosos experimentos han demostrado que tras una noche de sueño, o incluso tan solo una siesta, los recuerdos recién formados se retienen mejor que si ese tiempo se hubiera pasado en vigilia. Así sucede en la memoria declarativa (como cuando aprendemos una lista de palabras y asociaciones entre fotos y lugares) y en la memoria procedimental, base de las habilidades perceptivas y motoras (como tocar un instrumento).

La constatación de que el sueño favorecía la memoria llevó a buscar pruebas de que, durante la noche, el cerebro retomaba el material recién aprendido. Y se hallaron: los estudios realizados durante los últimos veinte años, primero en ratones y luego en humanos, revelaron que los patrones de actividad neural durante el sueño se asemejaban a veces a los de la vigilia. Así, cuando una rata aprende a moverse en un laberinto, ciertas neuronas de una parte del cerebro, el hipocampo, se activan en secuencias concretas. En el sueño posterior, se reproducen esos patrones más a menudo de lo que se esperaría por casualidad.

A partir de esos hallazgos, numerosos investigadores llegaron a la conclusión de que la repetición de tales secuencias durante el sueño consolidaba los recuerdos al fortalecer aún más las sinapsis (zonas de contacto entre neuronas) que se habían reforzado durante la vigilia. Según esta idea, dado que las neuronas conectadas se activan una y otra vez, sus sinapsis transportan mejor las señales, lo que ayuda a los circuitos nerviosos a codificar los recuerdos. Este proceso de refuerzo selectivo se conoce como potenciación sináptica; se cree que constituye el mecanismo principal en el aprendizaje y la memoria.



Pero aunque se sabe que la repetición y la potenciación se producen durante la vigilia, no se ha hallado ninguna prueba directa de que las sinapsis de los circuitos reactivados se refuercen durante el sueño. Esta falta de datos no nos sorprende en absoluto. Concuerda con la sospecha de que, mientras el individuo duerme, toda esa actividad cerebral (no solo de repetición, sino otros impulsos aleatorios) podría estar de hecho debilitando las conexiones nerviosas, no fortaleciéndolas.

EL PRECIO DE LA PLASTICIDAD

Hay tantas buenas razones para defender que las sinapsis deben debilitarse como que deben fortalecerse para que el cerebro funcione bien. Por una parte, las sinapsis fuertes consumen más energía que las débiles, y el cerebro no posee una cantidad infinita de energía. En los humanos consume un veinte por ciento de la energía del organismo (más que cualquier otro órgano en proporción a su peso), y al menos dos tercios de ese valor se emplean para mantener la actividad sináptica. La creación y consolidación de las sinapsis constituye además una de las mayores fuentes de estrés celular, ya que conlleva la síntesis y transporte de múltiples componentes en la célula: desde las mitocondrias (las centrales energéticas) y las vesículas sinápticas (que llevan las moléculas de señalización), hasta las proteínas y los lípidos que se necesitan en las conexiones sinápticas.

Pensamos que esta presión sobre los recursos resulta insostenible. El cerebro no puede reforzar y mantener, durante toda la vida del individuo, día y noche, las sinapsis reactivadas. No dudamos de que el aprendizaje se sustente sobre todo en la potenciación sináptica. Pero cuestionamos que esta continúe durante el sueño.

Por el contrario, la debilitación sináptica permitiría que los circuitos nerviosos recuperaran un nivel energético básico, con lo que se evitaría un consumo excesivo de energía y el estrés celular. A esta función restauradora la denominamos homeostasis sináptica, y a la propuesta general sobre la función del sueño, hipótesis de homeostasis sináptica. Esta explica el objetivo esencial y universal del sueño para todos los organismos que lo presentan: gracias a él, el cerebro recupera un estado que le permite aprender y adaptarse durante la vigilia. El riesgo que corremos cuando nos desconectamos del exterior durante horas es el precio que pagamos por este recalibrado neural. Dicho de otro modo, el sueño es el precio que pagamos por la plasticidad del cerebro (la capacidad de modificar sus conexiones en respuesta a la experiencia).

Pero ¿cómo explica la hipótesis los efectos beneficiosos del sueño en el aprendizaje y la memoria? ¿Cómo pueden las sinapsis debilitadas mejorar la retención general de habilidades y hechos? Debe tenerse en cuenta que, durante el curso de un día normal, casi todo lo que uno experimenta deja un rastro neural en el cerebro y que los sucesos significativos, como conocer a una nueva persona o aprender una pieza musical con la guitarra, constituyen una parte insignificante de esa codificación. Para mejorar la memoria, el cerebro dormido debe de alguna manera distinguir entre el «ruido» de la información irrelevante y la «señal» de los sucesos de interés.

Proponemos que durante el sueño, la estimulación espontánea de neuronas activa numerosos circuitos en múltiples combinaciones, que abarcan los nuevos recuerdos y las redes más antiguas de asociaciones aprendidas. La actividad espontánea deja que el cerebro compruebe cuáles de los nuevos recuerdos se integran mejor con los almacenados, de relevancia demostrada, y amortigua aquellas sinapsis que no encajan bien en el marco general de la memoria. Nosotros, entre otros, estamos explorando los posibles mecanismos por los que la actividad cerebral podría debilitar de manera selectiva las sinapsis que codifican «ruido» y al propio tiempo preservar aquellas que corresponden a una «señal».

Mientras el cerebro verifica estas situaciones imaginarias y atenúa las conexiones donde lo considera oportuno, resulta ventajoso mantenernos desconectados del mundo exterior y dejar de actuar en él; en otras palabras, conviene estar dormido. Del mismo modo, la restauración de la homeostasis sináptica no debería producirse durante la vigilia, ya que los sucesos del día dominarían el proceso y se daría mayor relevancia a ellos que a todo el conocimiento que el cerebro ha acumulado a lo largo de la vida. La desconexión profunda durante el sueño libera al cerebro de la tiranía del presente, creando una circunstancia ideal para la integración y consolidación de los recuerdos.

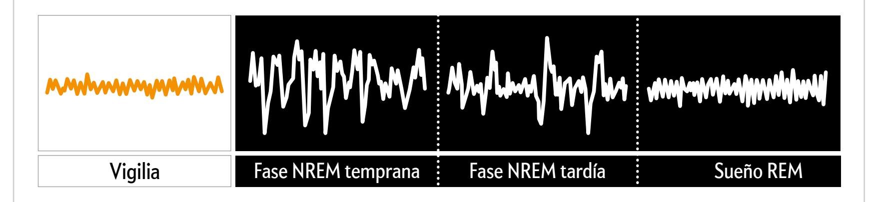
UNA CONEXIÓN DÉBIL

Nuestra propuesta de que el cerebro emite impulsos nerviosos durante el sueño para debilitar, y no para fortalecer, las sinap-

POSIBLE MECANISMO

El sueño viene en oleadas

Los registros de la actividad eléctrica del cerebro muestran que las ondas cerebrales experimentan cambios característicos a lo largo de la noche, mientras se alternan fases de sueño con movimientos oculares rápidos (REM) o sin ellas (NREM) (*gráficos*). La amplitud de las lentas ondas del sueño NREM disminuye durante la noche, lo que sugiere el debilitamiento de las sinapsis implicadas. Los autores proponen que este debilitamiento ocurre en parte porque las sustancias necesarias para fortalecer las sinapsis activadas están menos concentradas en ese momento.



JEN CHRISTIANSEN

sis se sustenta en parte en un análisis detallado de datos obtenidos a través de una técnica común en la investigación del sueño: el electroencefalograma, o EEG. Este registra los patrones de actividad eléctrica en la corteza cerebral a través de electrodos colocados sobre el cuero cabelludo. Hace unas décadas, los EEG realizados en individuos dormidos revelaron dos categorías principales de sueño: el paradójico, con movimientos oculares rápidos (o REM, por sus siglas en inglés) y el profundo, sin tales movimientos (NREM), que se alternaban durante la noche. Cada uno de ellos presenta un patrón de ondas cerebrales característico. Aparte del temblor de los globos oculares bajo los párpados cerrados que da al sueño REM su nombre, este estado está dominado por oscilaciones rápidas (subidas y bajadas en las curvas del EEG, semejantes a las registradas durante la vigilia). Por el contrario, en el sueño NREM predominan las oscilaciones lentas (con frecuencias de alrededor de un ciclo por segundo).

Hace una década, en los últimos años de su vida, Mircea Steriade, de la Universidad Laval de Quebec, descubrió que las oscilaciones lentas del sueño NREM tenían lugar cuando varios grupos de neuronas se activaban a la vez durante un tiempo (períodos de encendido), se silenciaban una fracción de segundo (períodos de apagado) y volvían a activarse de forma sincronizada. Fue uno de los hallazgos fundamentales en la investigación del sueño. Desde entonces se ha descubierto que en las aves y los mamíferos las ondas lentas aumentan de tamaño si están precedidas de un largo período de vigilia, mientras que lo reducen durante el sueño.

Planteamos que si las sinapsis eran fuertes, las neuronas sincronizarían más sus impulsos y producirían oscilaciones lentas más grandes. Si eran débiles, la sincronización disminuiría y las ondas lentas resultarían menores. Varias simulaciones por ordenador y experimentos con humanos y animales nos llevaron a la conclusión de que las ondas lentas grandes y pronunciadas registradas al inicio de la noche indicaban que las sinapsis se habían reforzado durante la vigilia previa; en cambio, las ondas lentas, pequeñas y suaves de las primeras horas de la mañana demostraban que las sinapsis se habían debilitado a lo largo del sueño.

La idea de que las sinapsis se atenúan o incluso dejan de funcionar mientras dormimos procede de estudios con animales. En las moscas de la fruta se ha observado que el sueño suprime el aumento progresivo en el número y tamaño de las sinapsis que se producen durante el día, sobre todo cuando se somete a los insectos a ambientes estimulantes. Las espinas sinápticas son protrusiones en una ramificación neuronal especializada en detectar señales. Las moscas de la fruta que pasan un día interaccionando con sus congéneres presentan más espinas sinápticas por la tarde que por la mañana.

Llama también la atención el hecho de que el número de espinas recupera un nivel básico a la mañana siguiente si, y solo si, se permite dormir a las moscas. Descubrimos un fenómeno similar en la corteza cerebral de ratones juveniles: las espinas tendían a aumentar cuando los animales estaban despiertos y a disminuir cuando dormían. En roedores adultos también se observó tal efecto, pero en lugar del número de espinas sinápticas, cambiaba la abundancia de ciertas moléculas que determinan la fuerza de la sinapsis, los receptores AMPA. Descubrimos que su número por sinapsis se elevaba tras la vigilia y se reducía tras el sueño. Con más receptores las sinapsis se fortalecían y con menos se debilitaban.

La fuerza sináptica puede medirse con una sonda eléctrica que estimula las fibras nerviosas de la corteza cerebral. Las neuronas responden con una descarga eléctrica más pronunciada cuando las conexiones son fuertes y menos cuando son débiles. En ratas, demostramos que las neuronas estimuladas se activaban con mayor vigor tras varias horas de vigilia y con menor firmeza después del sueño. Marcello Massimini, de la Universidad de Milán, y Reto Huber, ahora en la Universidad de Zúrich, realizaron un experimento similar en humanos. En lugar de una sonda eléctrica, recurrieron a la estimulación magnética transcraneal (pulso magnético corto aplicado sobre el cuero cabelludo). Y registraron la magnitud de las respuestas corticales con EGG de alta densidad. Los resultados fueron claros: cuanto más tiempo llevaba el sujeto despierto, mayores eran las respuestas recogidas en el EEG. Hizo falta una noche de sueño para que estas volvieran a la situación inicial.

MENOS ES MÁS

La conclusión general de estos experimentos, que realizamos durante dos décadas, es que la actividad cortical espontánea durante el sueño atenúa las conexiones sinápticas en los circuitos neuronales, ya sea reduciendo o eliminando su capacidad de enviar impulsos eléctricos.

Tal proceso, que hemos denominado debilitamiento selectivo, aseguraría la supervivencia de los circuitos «más aptos», bien porque habrían sido activados con fuerza durante la vigilia (como cuando se tocan las notas correctas en una guitarra mientras intentamos dominar una nueva pieza), o porque estarían mejor integrados con los recuerdos más antiguos (como cuando nos encontramos con una palabra nueva en un idioma conocido). Del mismo modo, se amortiguarían las sinapsis de los circuitos que se habrían activado solo ligeramente durante la vigilia (como las notas torpes en una guitarra) o que encajan peor con los recuerdos anteriores (como la presentación de una palabra nueva en un lenguaje desconocido).

El debilitamiento selectivo permitiría que los eventos insignificantes no dejaran rastro en nuestros circuitos, mientras que se conservarían los recuerdos destacados. Como una bonificación adicional, el mecanismo dejaría espacio para otro ciclo de consolidación sináptica durante la vigilia. De hecho, algunos hallazgos indican que además de los múltiples beneficios que supone para el aprendizaje y la memoria, el sueño ayudaría a la adquisición de nuevos recuerdos (el conocimiento adquirido antes del nuevo episodio de sueño). Numerosos estudios han demostrado que, después de una noche de sueño, se aprende mucho mejor que después de haber estado todo el día despierto.

Aunque todavía no existen pruebas directas del mecanismo que produciría el debilitamiento selectivo de las sinapsis, tenemos algunas ideas de cómo podría suceder. Sospechamos que las ondas lentas del sueño NREM en mamíferos cumplen una función en este proceso. En estudios de laboratorio sobre tejidos cerebrales de rata, la transmisión de señales entre neuronas se vuelve menos eficiente cuando estas son estimuladas de un modo que simula los ciclos sincronizados de encendido y apagado del sueño de onda lenta.

La química del cerebro también cambia durante el sueño NREM, y lo hace de un modo que podría atenuar las sinapsis. En el individuo despierto, una mezcla concentrada de sustancias señalizadoras, o neuromoduladores (acetilcolina, noreprinefina, dopamina, serotonina, histamina y hipocreatina), inunda el cerebro y tiende a fortalecer las sinapsis cuando las señales pasan por ellas. Durante el sueño (sobre todo en la fase NREM), la mezcla se halla mucho más diluida, lo que haría sesgar el circuito neural hacia un debilitamiento de las sinapsis, en lugar de un refuerzo, cuando las señales fluyen a su través. Otra sustancia, el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, por sus siglas en inglés), podría intervenir en el proceso. El BDNF consolida las sinapsis y participa en la adquisición de la memoria. Los niveles de BDNF ascienden durante la vigilia y descienden durante el sueño.

SUEÑO LOCAL

Con independencia de los mecanismos específicos y de los procesos selectivos, existen pruebas sólidas de que en varias especies la fuerza sináptica general aumenta durante la vigilia y disminuye durante el sueño, tal como predice la hipótesis de homeostasis sináptica. Podemos seguir comprobando la hipótesis mediante el examen de sus corolarios.

Si es correcta, cuanta más plasticidad experimente una parte del cerebro durante la vigilia, mayor será su necesidad de sueño. El tamaño y la duración de las ondas lentas del sueño NREM pueden indicar la necesidad de sueño. Para confirmar tal supuesto, pedimos a unos sujetos que aprendieran cierta tarea: alcanzar un objetivo en una pantalla de ordenador mientras se hacía girar el cursor (controlado por un ratón). La parte del cerebro que está implicada en este tipo de aprendizaje corresponde a la corteza parietal derecha. En efecto, cuando los sujetos dormían, se registraron en esa región ondas lentas de mayor tamaño, en comparación con las de la noche anterior al aprendizaje. Esas ondas se achataron durante la noche, como sucede normalmente. Pero las ondas grandes y localizadas durante el comienzo de la noche nos cuentan que esa zona del cerebro se hallaba exhausta debido a la tarea asignada.

Desde entonces, numeorosos experimentos realizados por nosotros y otros científicos han confirmado que el aprendizaje y, de un modo más general, la activación de las sinapsis en los circuitos, produce un incremento local de la necesidad de sueño. Hace poco hemos descubierto incluso que, tras un uso prolongado o intenso de determinados circuitos, ciertos grupos de neuronas se «duermen» aunque el cerebro (y el resto del organismo) siga despierto. Por consiguiente, si una rata se mantiene insomne más tiempo del habitual, algunas neuronas corticales muestran períodos breves de reposo que resultan indistinguibles de los períodos de apagado observados durante el sueño de onda lenta. Mientras tanto el roedor sigue dando vueltas, activo, con los ojos abiertos, igual que haría cualquier rata despierta.

Este fenómeno se llama sueño local, y está suscitando un atento examen por parte de otros investigadores. Nuestros estudios más recientes indican que en el cerebro de humanos privados de sueño tienen lugar períodos de apagado localizados, y estos se vuelven más frecuentes tras un aprendizaje intenso. Parece que cuando llevamos despiertos demasiado tiempo o hemos empleado en exceso determinados circuitos, pequeñas partes del cerebro se echan siestas rápidas sin avisar. Uno se pregunta cuántos errores de juicio, fallos tontos, respuestas irritadas y mal humor se deben al sueño local del cerebro de gente exhausta que cree que está despierta por completo y controla la situación.

La hipótesis también predice que el sueño reviste especial importancia durante la infancia y la adolescencia, fases de intenso aprendizaje y remodelación sináptica profunda, según han demostrado numerosos estudios. Durante la juventud, las sinapsis se forman, refuerzan y eliminan con una frecuencia extraordinaria que ya no se repite en la edad adulta. Parece lógico que el debilitamiento selectivo durante el sueño resulte esencial para minimizar el gasto energético de esta frenética remodelación sináptica y para favorecer la supervivencia de los circuitos nerviosos más aptos en esas etapas de la vida. Cabe preguntarse qué sucede cuando el sueño se ve perturbado o es insuficiente durante períodos fundamentales del desarrollo ¿Podría el déficit alterar el funcionamiento de los circuitos? En ese caso, el insomnio podría provocar no solo un olvido ocasional o un error de juicio, sino cambios duraderos en las conexiones del cerebro.

Estamos deseando comprobar las predicciones de la hipótesis de homeostasis sináptica y explorar sus implicaciones en profundidad. Esperamos descubrir si la privación de sueño durante el desarrollo neural produce modificaciones en la organización de los circuitos cerebrales. Nos gustaría también conocer mejor el efecto del sueño en áreas profundas del cerebro, como el tálamo, el cerebelo, el hipotálamo o el tronco encefálico, así como el papel del sueño REM en la homeostasis sináptica. Quizás entonces averigüemos si el sueño constituye un mecanismo para compensar el desgaste asociado a la plasticidad del cerebro durante la vigilia.

PARA SABER MÁS

Is sleep essential? Chiara Cirelli y Giulio Tononi en *PLOS Biology*, vol. 6, n.º 8, págs. 1605-1611, agosto de 2008.

Dormir para recordar. Pierre Maquet en *Mente y Cerebro*, n.º 43, julio/agosto de 2010.

The memory function of sleep. Susanne Diekelmann y Jan Born en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 11, n.º 2, págs. 114-126, febrero de 2010.

Local sleep in awake rats. Vladyslav V. Vyazovskiy, Umberto Olcese, Erin C. Hanlon, Yuval Nir, Chiara Cirelli y Giulio Tononi en *Nature*, vol. 472, págs. 443-447, 28 de abril de 2011.

Sleep and synaptic homeostasis: Structural evidence in *Drosophila*. Daniel Bushey, Giulio Tononi y Chiara Cirelli en *Science*, vol. 332, págs. 1576-1581, 24 de junio de 2011.

Secretos del descanso reparador. Jason Castro en *Mente y Cerebro*, n.º 60, mayo/junio de 2013.

FILOSOFÍA DE LA FÍSICA

¿Qué es



real?

Los físicos hablan del mundo como si estuviese compuesto de partículas y campos de fuerza. Sin embargo, no parece quedar claro qué representan dichos conceptos. En su lugar, el universo podría consistir en colecciones de propiedades, como la forma y el color

Meinard Kuhlmann



Meinard Kuhlmann, profesor de filosofía en la Universidad de Bielefeld, recibió la doble titulación en física y filosofía. Ha trabajado en las universidades de Oxford, Chicago y Pittsburgh.

Los físicos suelen describir el mundo en términos de partículas que interaccionan unas con otras mediante campos de fuerza. Su disciplina recibe el nombre de «física de partículas», y sus instrumentos, «aceleradores de partículas». Según esta imagen, el universo se asemejaría a un lego. Pero semejante visión esconde bajo la alfombra algunos hechos poco conocidos. En física cuántica, las interpretaciones de partícula y campo difieren hasta tal punto de los conceptos tradicionales que, cada vez más, los expertos se plantean la posibilidad de que el mundo se componga de algo completamente distinto.

No es que los físicos carezcan de una teoría adecuada para describir el mundo subatómico. Tienen una: la teoría cuántica de campos. Desarrollada entre finales de los años veinte y principios de los cincuenta del pasado siglo, dicha teoría conjuga la mecánica cuántica con la relatividad especial de Einstein. Constituye el marco conceptual sobre el que se apoya el modelo estándar de la física de partículas, el cual describe bajo un marco unificado los ladrillos que componen la materia y sus interacciones. En lo que a su precisión empírica se refiere, se trata de la teoría más exitosa de la historia de la ciencia. Los científicos la usan todos los días para calcular qué sucede en las colisiones de partículas, cómo se creó la materia tras la gran explosión que dio origen a nuestro universo, qué ocurre en el interior de los núcleos atómicos y mucho más.

Así las cosas, tal vez sorprenda saber que los físicos no están seguros de qué dice su teoría; desconocen su ontología, o imagen física primaria. Semejante desconcierto no guarda ninguna relación con los muy discutidos misterios de la mecánica cuántica, en los que los gatos están vivos y muertos a la vez. Pero la falta de una interpretación nítida sobre el significado de la teoría cuántica de campos está lastrando la investigación de las teorías que, como la de cuerdas, intentan superar al modelo estándar. Resulta arriesgado formular una teoría nueva cuando no comprendemos bien la actual.

A primera vista, el contenido del modelo estándar parece obvio. Por un lado tenemos varios tipos de partículas elementales, como quarks y electrones; por otro, disponemos de distintos campos de fuerza, los cuales median las interacciones entre partículas. Esa descripción aparece una y otra vez en todo tipo de diagramas didácticos y en los artículos de esta revista. Sin embargo, y por convincente que parezca, dicha imagen no resulta satisfactoria en absoluto.

Pare empezar, las dos categorías se funden en una sola. La teoría cuántica de campos asigna un campo a cada tipo de partícula. De esta manera, al igual que existe el electrón, hay también un campo asociado al electrón. Dichos campos se hallan cuantizados, lo que da lugar a partículas, como los fotones. Así, la distinción entre partículas y campos resulta artificial, si bien a menudo los físicos hablan como si unos fuesen más fundamentales que las otras, o viceversa. El debate se ha arremolinado en torno a este punto: en última instancia, ¿trata la teoría sobre campos o sobre partículas? Todo comenzó como una batalla entre titanes, con eminentes físicos y filósofos a ambos lados. Ambos conceptos se usan aún hoy con un propósito ilustrativo, aunque la mayoría de los físicos admitan que tales nociones clásicas no casan bien la teoría. Pero si las imágenes mentales que conjuran los términos *partícula* y *campo* no se dejan reconciliar con la teoría, tal vez los físicos y los filósofos deberíamos pensar con qué sustituirlos.

Con las dos opciones clásicas en un punto muerto, algunos filósofos de la física se han decantado por alternativas más radicales. Sugieren que los constituyentes básicos del mundo material serían entidades intangibles, como relaciones o propiedades. Una versión extrema de esta línea de pensamiento afirma que todo puede reducirse a intangibles, sin referencia alguna a objetos individuales. A pesar de que se trata de una idea revolucionaria y nada intuitiva, no falta quien argumenta que es la física la que nos apremia a adoptar semejante posición.

EL PROBLEMA CON LAS PARTÍCULAS

Al pensar en la realidad subatómica, la mayoría de la gente —expertos incluidos— imagina partículas que se comportan como bolas de billar. Esta noción, que procede de los atomistas griegos, alcanzó su apogeo con las teorías de Isaac Newton. Con todo, son varias las razones que evidencian que las entidades fundamentales de la teoría cuántica de campos no guardan ninguna relación con las bolas de billar.

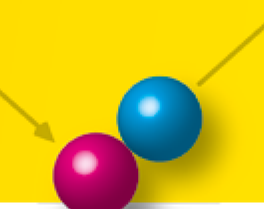
EN SÍNTESIS

¿Sobre qué versa la física de partículas? La mayoría de la gente imagina las partículas elementales como pequeñas bolas de billar. Sin embargo, dicha representación no se ajusta a la realidad.

Los físicos consideran que las partículas son excitaciones localizadas de campos cuánticos, como el electromagnético. Sin embargo, los campos encierran sus propias paradojas.

Si ni campos ni partículas resultan fundamentales, ¿qué lo es? Algunos investigadores creen que el universo no consta de objetos, sino de meras relaciones o propiedades como la masa, la carga o el espín.

PÁGINAS ANTERIORES: TRAVIS RATHBONE (*fotografía*), SARAH GUIDO (*diseño*)



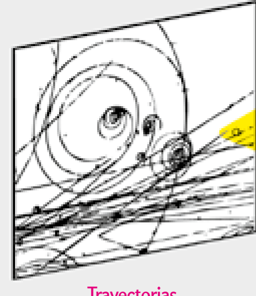
Más que simples bolas de billar

A pesar de su nombre, las «partículas» de la física de partículas no exhiben las propiedades que normalmente adscribimos a tales objetos: bloques discretos, localizados y fundamentales de materia. A continuación enumeramos algunos atributos muy poco intuitivos.

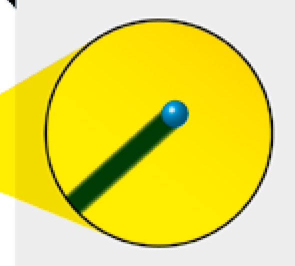
Lo que vemos | **Lo que deducimos** | **Por qué es incorrecto**

Las partículas son objetos localizados

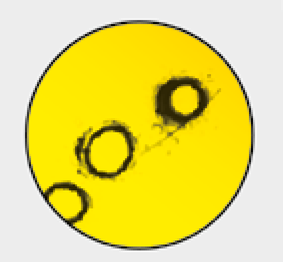
Por definición, una partícula posee una posición bien definida, la cual cambia con el tiempo a medida que se mueve. La teoría cuántica, sin embargo, no permite la existencia de trayectorias nítidas. Aunque así parezcan indicarlo algunos instrumentos, como las cámaras de burbujas, resulta falaz inferir la existencia de objetos que atraviesan el espacio como si fuesen canicas. Sus trazas no representan más que una serie de sucesos individuales.



Trayectorias en una cámara de burbujas



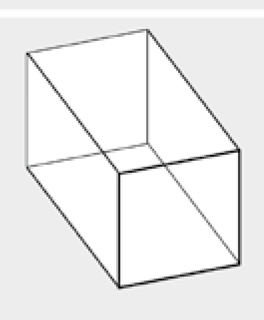
Las partículas han atravesado la cámara y han dejado una traza nítida



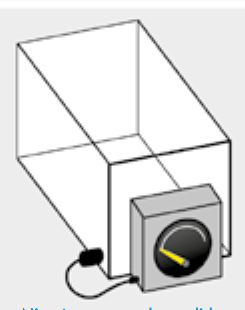
Dicha traza no es más que una serie de burbujas inconexas

En ausencia de partículas no sucede nada

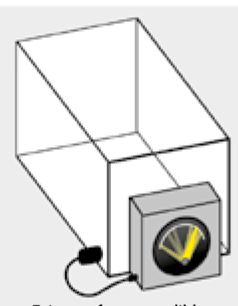
Si las partículas forman la materia, entonces el vacío (un estado sin partículas) no debería mostrar ninguna actividad. No obstante, existen algunos efectos físicos medibles (como el efecto Casimir) que pueden asociarse a las propiedades cuánticas del vacío.



Campo en el estado de vacío



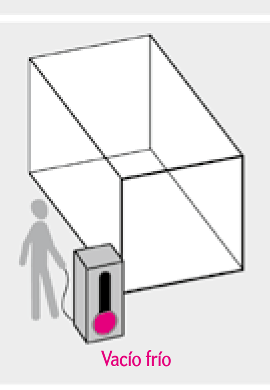
Ningún aparato de medida detectará nada



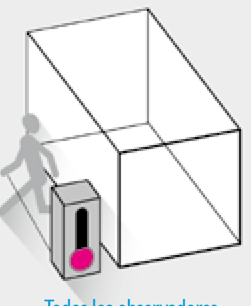
Existen efectos medibles incluso en ausencia de partículas

Una partícula existe o no existe

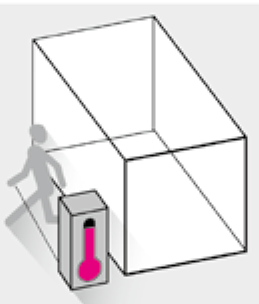
Para determinar si algo es real o no, deberíamos poder aplicar un test muy sencillo: todos los observadores han de estar de acuerdo en su (in)existencia. Pero las «partículas» no superan esta prueba. Donde un observador en reposo detecta un vacío frío, un observador acelerado verá un gas de partículas a cierta temperatura.



Vacío frío



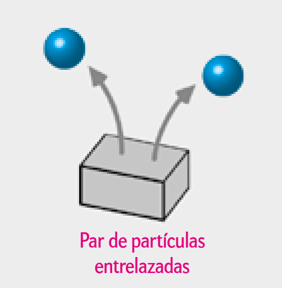
Todos los observadores detectarán un vacío frío



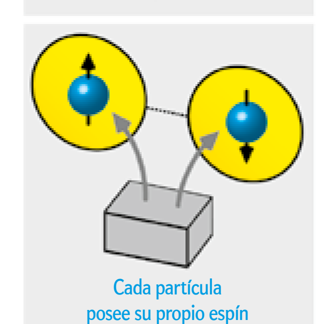
Un observador acelerado ve un gas caliente de partículas

Las partículas poseen propiedades bien definidas

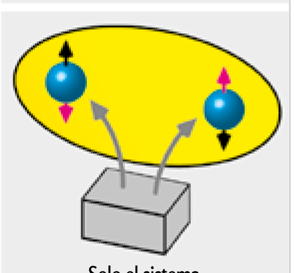
Se supone que las partículas tienen energía, momento y otros atributos. En el entrelazamiento cuántico, sin embargo, dos objetos se comportan como un «todo» que no puede describirse como una suma de partes. En tales casos, las supuestas partículas carecen de propiedades individuales bien definidas.



Par de partículas entrelazadas



Cada partícula posee su propio espín



Solo el sistema tiene un espín bien definido

JEN CHRISTIANSEN

En primer lugar, el concepto mismo de partícula implica que hay algo que existe en una localización determinada. Pero las «partículas» de la teoría cuántica de campos no poseen una posición definida. Piense, por ejemplo, en una de las partículas de su cuerpo. En sentido estricto, no tiene por qué hallarse en el interior de su cuerpo. Si un observador intentase medir su posición, obtendría una probabilidad ínfima, pero distinta de cero, de encontrarla en el rincón más remoto del cosmos. Semejante contradicción ya se plasmaba en las formulaciones previas de la mecánica cuántica, pero empeoró cuando los físicos unificaron la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad. Las partículas cuánticas relativistas resultan muy escurridizas; no residen en ninguna región específica del universo.

Segundo, imagine que ha ubicado una partícula en la cocina de su casa. Un amigo suyo, que observa su vivienda desde un automóvil en movimiento, podría observar la misma partícula esparcida a lo largo y ancho del cosmos. Lo que se encuentra localizado para usted puede no estarlo para su amigo. No solo la posición de la partícula depende del punto de vista, sino también el hecho mismo de que la partícula posea o no una posición. En tal caso, carece de sentido pensar que las partículas localizadas constituyan entidades básicas.

En tercer lugar, incluso si abandonamos la idea de localizar las partículas y nos limitamos a contarlas, nos veremos en dificultades. Imagine que desea saber el número de partículas que hay en de su casa. Tras recorrer todas las habitaciones, halla tres en el salón, cinco bajo la cama, ocho en la cocina, etcétera. Ahora las suma. Para su consternación, ese resultado no le proporcionará el número total de partículas. En teoría cuántica de campos, dicho número corresponde a una propiedad de la casa entendida como un todo; para determinarlo, debería hacer lo imposible y medir toda la vivienda a la vez, en lugar de estancia por estancia.

Un caso extremo en el que resulta inviable identificar partículas es en el vacío, un concepto peliagudo en teoría cuántica de campos. Por definición, el vacío constituye un estado con cero partículas. Pero podemos tener un vacío total y, al mismo tiempo, observar algo muy distinto del vacío en cualquier región finita del espacio. En otras palabras, aunque su casa se encuentre vacía por completo, puede que halle partículas en la cocina o en el comedor. Si los bomberos le preguntan si aún queda alguien en el interior de un edificio en llamas y usted responde que no, puede que pongan en duda su cordura si, una vez dentro, comienzan a hallar gente por todos lados.

Otra de las propiedades más llamativas del vacío de la teoría cuántica de campos la hallamos en el efecto Unruh. Un astronauta en reposo tal vez crea que se halla en medio del vacío más absoluto; sin embargo, un compañero que viaja en una nave espacial en movimiento acelerado observará que la misma región se encuentra inmersa en un baño térmico formado por innumerables partículas. Esta discrepancia entre ambos puntos de vista se da asimismo en la frontera de los agujeros negros, con consecuencias paradójicas para la materia que cae en ellos [*véase* «Los agujeros negros y la paradoja de la información», por Leonard Susskind; Investigación y Ciencia, junio de 1997]. Si un vacío lleno de partículas suena absurdo, es porque la noción clásica de partícula nos confunde. Nuestra teoría debe estar describiendo algo distinto. Si el número de partículas depende del observador, entonces no parece muy coherente suponer que las partículas constituyan entidades básicas. Podemos aceptar que un gran número de propiedades dependan del observador, pero cuántos bloques fundamentales tenemos no debería ser una de ellas.

Por último, las partículas pueden perder su individualidad. En el desconcertante fenómeno del entrelazamiento cuántico, varias partículas acaban formando un sistema mayor, en el que las propiedades que permitían distinguirlas se desvanecen. Cuando eso sucede, las presuntas partículas no solo comparten características innatas, como la masa o la carga, sino también sus propiedades espaciales y temporales, como el abanico de posiciones donde podemos encontrarlas. Cuando dos partículas se encuentran entrelazadas, un observador no tiene forma de distinguir una de otra. Llegados a este punto, ¿realmente podemos decir que tenemos *dos* partículas?

Podríamos zanjar la cuestión sin más que decretar que nuestras dos partículas constituyen dos objetos individuales. Los filósofos denominan dicho dictado *esteidad primitiva* (o *haecceidad primitiva*, del latín *haec*, «esto»). La mayoría de los físicos y los filósofos se muestran muy escépticos sobre tales decretos. De hecho, no parece que realmente tengamos dos partículas. El sistema entrelazado se comporta como una entidad indivisible, por lo que la noción de parte —por no hablar de la de partícula— pierde su significado.

Semejantes problemas teóricos se dan de bruces con los experimentos. A fin de cuentas, ¿qué detecta un detector de partículas, si no partículas? La respuesta a esta pregunta es la siguiente: las partículas no son más que una inferencia. Un detector solo registra un gran número de excitaciones dispersas a lo largo de un sensor. Pero si intentamos conectar esas señales para deducir la existencia de partículas que siguen trayectorias definidas, nos veremos en problemas. (Aviso: algunas interpretaciones minoritarias de la física cuántica sí consideran trayectorias bien definidas; sin embargo, sufren sus propias dificultades, por lo que aquí nos ceñiremos al punto de vista estándar [*véase* «Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica», por David Z. Albert; Investigación y Ciencia, julio de 1994].)

Recapitulemos. Solemos pensar en una partícula como en una pequeña bola de billar; sin embargo, lo que los físicos modernos llaman «partículas» no guarda ninguna relación con tales objetos. Según la teoría cuántica de campos, un objeto no puede localizarse en ninguna región finita del espacio, por grande que esta sea. Además, el supuesto número de partículas depende del estado de movimiento del observador. Juntos, todos estos resultados nos obligan a abandonar la idea de que la naturaleza se componga de nada parecido a pequeñas canicas.

Esas y otras consideraciones nos obligan a admitir que el término «física de partículas» resulta engañoso. Por más que los físicos sigan hablando de partículas, tales objetos no existen. Tal vez podríamos llamarlas «partículas cuánticas», pero ¿cómo justificar el empleo de dicho vocablo, si casi no guarda ninguna relación con la noción clásica de partícula? Debemos agarrar el toro por los cuernos y abandonar de una vez el concepto de partícula. Para algunos, estas dificultades indican que la teoría cuántica de campos debería interpretarse únicamente en términos de campos. Tal línea de razonamiento sostiene que las partículas constituyen pequeñas ondulaciones de campos que impregnan el espacio, como un fluido invisible. Pero, tal y como veremos, la teoría cuántica de campos tampoco se deja interpretar con facilidad en dichos términos.

EL PROBLEMA CON LOS CAMPOS

El nombre «teoría cuántica de campos» sugiere una teoría que trata sobre la versión cuántica de los campos clásicos, como los eléctricos y magnéticos. Ahora bien, ¿qué significa «versión cuántica»? El término *campo* evoca la imagen de un conjunto de

limaduras de hierro alineándose en torno a un imán, o campos eléctricos que ponen los pelos de punta. Pero los campos cuánticos difieren tanto de los clásicos que incluso los físicos teóricos reconocen que apenas pueden visualizarlos.

En física clásica, un campo asocia a cada punto del espacio una cantidad física, como la temperatura o la intensidad eléctrica. En cambio, un campo cuántico asigna entidades matemáticas abstractas, las cuales representan la clase de medidas que podemos efectuar, no los resultados que obtendríamos. Algunas de las construcciones matemáticas de la teoría sí corresponden a valores físicos, pero estas no pueden asignarse a puntos del espaciotiempo, sino solo a regiones dispersas.

Desde un punto de vista histórico, los físicos llegaron la teoría cuántica de campos tras *cuantizar* la teoría clásica. En este proceso, las cantidades físicas se reemplazan por operadores, objetos matemáticos que representan operaciones como la diferenciación o la raíz cuadrada. Algunos operadores se corresponden con procesos físicos, como la emisión o absorción de luz.

Los operadores añaden una capa de abstracción entre la teoría y la realidad. Un campo clásico se asemeja a un mapa meteorológico que nos indica la temperatura en cada ciudad. La versión cuántica, en cambio, en lugar de mostrarnos «25 grados», nos dice «$\sqrt{\ }$». Para obtener el valor de la temperatura, debemos dar un paso más y aplicar el operador a otra entidad matemática: el vector de estado, el cual representa la configuración del sistema en cuestión.

En cierto modo, esas peculiaridades no resultan tan sorprendentes. La mecánica cuántica no trabaja con valores exactos, sino solo con probabilidades. Pero, desde un punto de vista ontológico, la situación se revela aquí aún más extraña, ya que las entidades supuestamente fundamentales (los campos cuánticos) no bastan para especificar ninguna probabilidad. Necesitamos combinarlas con el vector de estado.

La necesidad de aplicar el campo cuántico al vector de estado hace que resulte muy difícil interpretar la teoría, traducirla a términos físicos que podamos imaginar y manipular mentalmente. El vector de estado es holístico. Describe el sistema como un todo y no hace referencia a ninguna localización concreta. Su papel socava una de las características definitorias de los campos; a saber, su dispersión espaciotemporal. Un campo clásico nos permite visualizar un fenómeno como la luz mediante una onda que se propaga por el espacio. Los campos cuánticos nos arrebatan esta imagen y nos dejan desamparados a la hora de decir cómo funciona el mundo.

Así pues, la imagen usual de partículas elementales y campos de fuerza no proporciona una ontología satisfactoria del mundo. No aclara en absoluto qué es una partícula o un campo. A menudo, los físicos arguyen que las partículas y los campos deben interpretarse como aspectos complementarios de la realidad. Pero esa caracterización no nos ayuda, ya que ninguna de las dos concepciones funciona ni siquiera en aquellos casos en los que deberíamos observar solo uno de dichos aspectos. Por fortuna, las partículas y los campos no agotan las posibles ontologías de la teoría cuántica de campos.

¿LAS ESTRUCTURAS AL RESCATE?

Cada vez son más quienes creen que lo importante no son las cosas en sí, sino las relaciones entre ellas. Este punto de vista rompe con las concepciones atomistas del mundo material de una forma mucho más radical que una simple modificación de los conceptos de campo o partícula.

Dicha posición, conocida como realismo estructural, llegó bajo la forma de una versión bastante moderada, denominada realismo estructural epistémico. Esta última afirma que puede

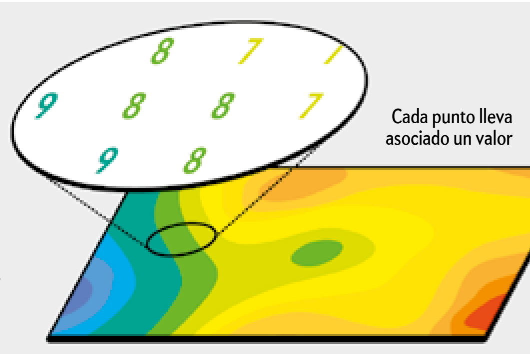
EL CONCEPTO DE CAMPO

¿Cómo visualizar un campo?

Los objetos que describe la teoría cuántica de campos guardan muy poca relación con el concepto clásico. Ello dificulta sobremanera su interpretación.

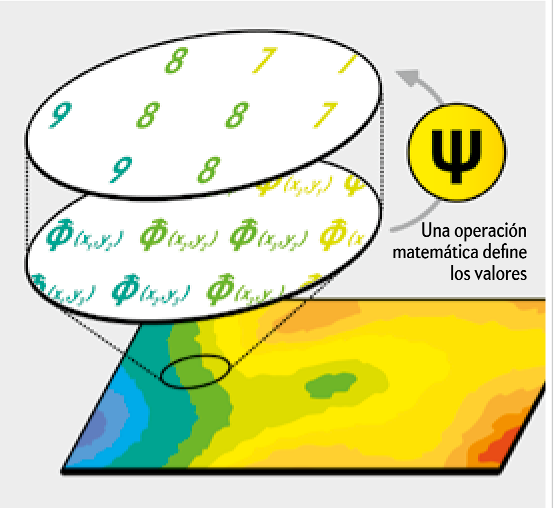
Campo clásico

Un campo clásico se asemeja a un fluido que impregna el espacio y que toma un valor en cada punto. La intensidad del campo eléctrico, por ejemplo, resulta mayor cerca de un cable. Si situamos allí un objeto dotado de carga eléctrica, la intensidad del campo determinará la fuerza que experimentará el objeto. El campo también especifica la dirección en que se moverá (*no mostrada aquí*).

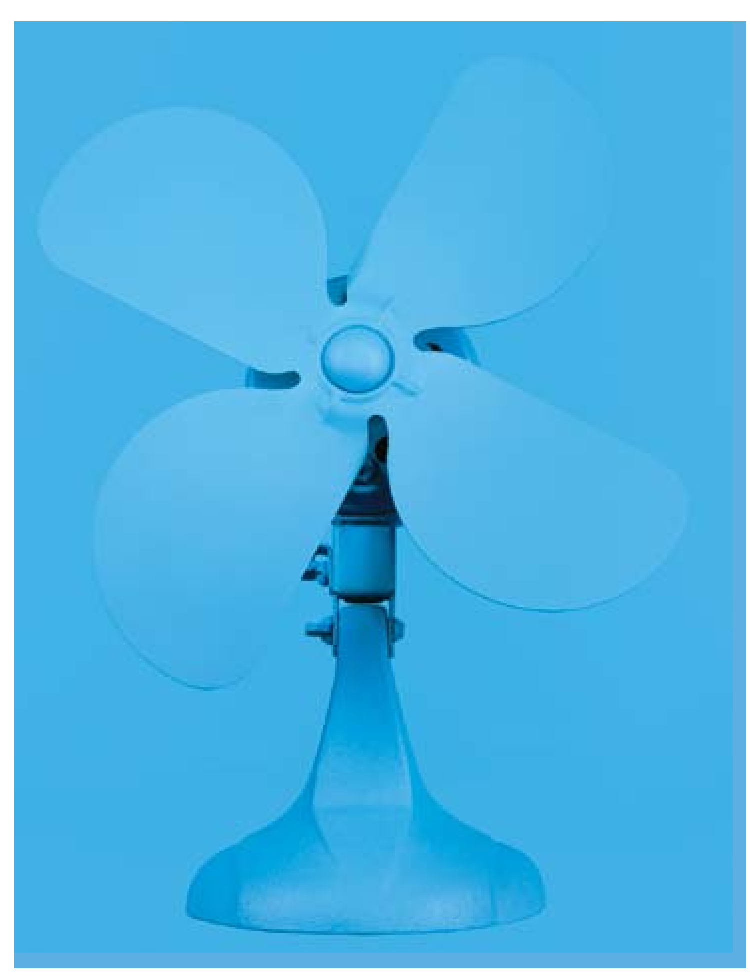


Campo cuántico

Los campos cuánticos difieren de los clásicos en varios aspectos. Un punto del espacio no se encuentra vinculado a ninguna cantidad física concreta, sino a un espectro de cantidades posibles. Los valores que pueden obtenerse tras una medida dependen de otro constructo matemático: el vector de estado. Este no se halla asociado a ninguna localización concreta, sino que abarca todo el espacio.



JEN CHRISTIANSEN



punto de vista. Las partículas y los campos exhiben simetrías más abstractas, pero la idea es la misma.

Según el principio de la navaja de Occam, los físicos y los filósofos prefieren aquellas ideas que explican los mismos fenómenos con el menor número de hipótesis. En este caso, podemos construir una teoría perfectamente válida sin más que postular la existencia de cierta clase de relaciones. No necesitamos añadir los objetos. Los partidarios del realismo estructural óntico sostienen que podemos prescindir de las cosas y limitarnos a suponer que el mundo no contiene más que estructuras, o redes de relaciones.

En la vida diaria nos encontramos con múltiples situaciones en las que solo cuentan las relaciones entre objetos y en las que detenerse a describirlos sería un lastre. En una red de metro, por ejemplo, resulta fundamental saber cómo se conectan las distintas estaciones. En Londres, St. Paul's se halla enlazada con Holborn, mientras que desde Blalckfriars hay que realizar al menos un trasbordo, a pesar de que esta última se halla más cerca de Holborn que St. Paul's. Lo relevante es la estructura de las conexiones. El hecho de que la estación de Blalckfriars haya sido renovada hace poco carece de importancia para quien desea viajar en metro.

Otros ejemplos en los que las estructuras resultan más importantes que su realización material los hallamos en Internet, en las redes neuronales del cerebro o en el genoma. Todas ellas continúan funcionando cuando un ordenador, una célula o una persona desaparece. Si bien estos casos solo aportan analogías imprecisas, su espíritu refleja los argumentos aplicables a la teoría cuántica de campos.

que jamás lleguemos a conocer la naturaleza real de las cosas, sino solo sus relaciones mutuas. Tomemos la masa como ejemplo. ¿Ha visto alguien alguna vez la masa en sí? No. Solo observamos lo que la masa implica para otros objetos o, dicho de otra forma, cómo un cuerpo dotado de masa interacciona con otro por medio de un campo gravitatorio local. La estructura del mundo, que refleja el modo en que las cosas se interrelacionan, constituye la parte más duradera de las teorías físicas. Las nuevas teorías pueden invalidar nuestra imagen de los ladrillos fundamentales del universo, pero tienden a preservar las estructuras. Gracias a ello avanza la ciencia.

¿A qué se debe que solo podamos conocer la relación entre las cosas, en lugar de las cosas en sí? La respuesta más simple a dicha pregunta es que solo existen las relaciones. Este salto conceptual convierte al realismo estructural en una propuesta mucho más extrema, llamada realismo estructural óntico.

La gran cantidad de simetrías de la física moderna apoya el realismo estructural óntico. Tanto en mecánica cuántica como en la teoría de la gravedad de Einstein, ciertos cambios en la configuración del mundo (transformaciones de simetría) carecen de consecuencias empíricas. Dichas transformaciones intercambian objetos individuales, pero mantienen intactas sus relaciones mutuas. A modo de analogía, considere un rostro simétrico. La reflexión en un espejo intercambia el ojo derecho por el izquierdo, la fosa nasal derecha por la izquierda, etcétera. Sin embargo, sus posiciones relativas permanecen invariantes. Son esas relaciones las que realmente definen una cara; por el contrario, etiquetas como «izquierda» o «derecha» dependen del

Una línea de pensamiento relacionada usa el entrelazamiento cuántico para defender el papel de las estructuras como base de la realidad. El entrelazamiento constituye un efecto holístico. Las propiedades intrínsecas de las partículas, como su carga, y las intrínsecas, como su posición, no bastan para determinar el estado del sistema completo: el conjunto es más que la suma de las partes. Ello hace tambalear la imagen atomista del mundo, en la que todo queda determinado por las propiedades de los bloques fundamentales y sus relaciones espaciotemporales. En lugar de considerar primarias las partículas y secundario el entrelazamiento, tal vez deberíamos sopesar la opción contraria.

Puede que el lector se extrañe ante la idea de que existan las relaciones pero no los objetos que deberían relacionarse. Sería como hablar de un matrimonio sin esposos. Un gran número de físicos y filósofos también encuentran la idea estrafalaria; no creen que sea posible obtener objetos sólidos basándose únicamente en sus relaciones. Algunos partidarios del realismo estructural óntico han intentado hallar un compromiso: no niegan que los objetos existan, pero sostienen que son las relaciones, o las estructuras, las que ocupan el primer lugar desde un punto de vista ontológico. En otras palabras, los objetos no poseerían propiedades intrínsecas, sino solo aquellas que provienen de su relación con otros objetos.

Sin embargo, semejante posición se antoja desabrida. Todos aceptamos que existen relaciones entre los objetos. La única postura nueva e interesante es la que sostiene que todo emerge como consecuencia de dichas relaciones. En suma, el realismo estructural óntico se revela como una idea provocativa, cuyo

DISEÑO DE SARAH GUIDO

desarrollo tal vez nos permita solucionar nuestros problemas interpretativos.

COLECCIONES DE PROPIEDADES

Una segunda alternativa a la hora de analizar el significado de la teoría cuántica de campos se apoya en una simple observación. A pesar de que las interpretaciones basadas en campos y partículas se han considerado muy distintas, ambas tienen algo en común. Las dos asumen que los objetos fundamentales del mundo material son entidades individuales a las que podemos adscribir propiedades. Dichas entidades son las partículas o, en el caso de la teoría de campos, los puntos del espaciotiempo. Numerosos filósofos, sin embargo, consideramos que semejante división entre objetos y propiedades podría ser la causa de todas las dificultades. En nuestra opinión, tal vez convendría considerar las propiedades como la única categoría fundamental.

En general, suele pensarse que las propiedades constituyen *universales*; es decir, que pertenecen a una categoría general y abstracta. Siempre aparecen asociadas a objetos particulares, por lo que no podrían existir sin estos últimos. (Aquí hemos de aclarar que Platón sí creía en su existencia autónoma, pero solo en algún plano superior de la realidad, ajeno al espacio y el tiempo de nuestro mundo.) Cuando pensamos en el color rojo, solemos imaginar cosas rojas, no una «rojez» flotando en el aire. No obstante, podemos dar la vuelta a esta manera de pensar y otorgar a las propiedades una existencia propia. Las propiedades podrían ser lo que los filósofos llamamos *particulares*; es decir, entidades individuales y concretas. En tal caso, lo que normalmente denominamos «objetos» no serían más que una colección de propiedades: color, forma, consistencia, etcétera.

Dado que considerar las propiedades como particulares (en lugar de como universales) diverge del punto de vista tradicional, los filósofos hemos acuñado un nuevo término para describirlas: *tropos*. Por desgracia, el término evoca connotaciones erróneas, pero hoy por hoy está establecido.

A la hora de conceptualizar el mundo, no solemos concebir las cosas como una mera colección de propiedades. Sin embargo, la idea tal vez nos parezca más plausible si intentamos desaprender nuestra manera de ver el mundo y nos remontamos a los primeros años de nuestra vida. Cuando un bebé observa una pelota y experimenta con ella por primera vez, no percibe una pelota en sentido estricto, sino una forma esférica, flexible y de color rojo. Solo más tarde asociará ese conjunto de percepciones a un objeto de cierta clase: a saber, una pelota. En momentos posteriores de nuestra vida, cada vez que veamos una nos limitaremos a decir «¡mira, una pelota!», pero estaremos pasando por alto todo el aparato conceptual involucrado en semejante afirmación.

Si aplicamos la misma idea a la teoría cuántica de campos, veremos que un electrón no es más que una serie de propiedades, o tropos: tres propiedades esenciales y fijas (masa, carga y espín), y otras cambiantes y no esenciales, como la posición o velocidad. Una concepción basada en tropos nos ayuda a dar sentido a la teoría. Por ejemplo, esta predice que las partículas elementales pueden surgir y desvanecerse de modo repentino. El comportamiento del vacío en teoría cuántica de campos nos deja atónitos: su número medio de partículas es cero, pero hierve de actividad con una cantidad ingente de procesos que involucran la creación y destrucción de todo tipo de partículas.

Desde una ontología de partículas, semejante actividad resulta paradójica. Si las partículas son fundamentales, ¿cómo pueden crearse? ¿A partir de qué se materializan? En la ontología de tropos, en cambio, se trata de una situación natural. El vacío, aun carente de partículas, posee ciertas propiedades. Una partícula no es más que lo que emerge cuando algunas de esas propiedades se agrupan de cierta forma.

FÍSICA Y METAFÍSICA

¿Cómo puede generar tanta controversia una teoría con un éxito empírico tan rotundo como la teoría cuántica de campos? La respuesta es sencilla. Aunque la teoría nos dice lo que podemos medir, apenas nos susurra la naturaleza de las entidades que dan lugar a las observaciones. La teoría da cuenta de dichas observaciones en términos de quarks, muones, fotones y todo un surtido de campos cuánticos, pero no nos aclara qué es un fotón o un campo cuántico. Y no tiene por qué hacerlo. Una teoría física puede revelarse muy válida sin ninguna necesidad de responder a tales cuestiones metafísicas.

Para muchos físicos, ese logro resulta más que suficiente. Se decantan por una actitud instrumentalista: niegan que las teorías físicas representen el mundo. Para ellos, una teoría no constituye más que un instrumento para efectuar predicciones experimentales. A pesar de ello, la mayoría de los científicos sí poseen una fuerte intuición de que sus teorías captan, al menos en parte, algunos aspectos de la naturaleza previos a la realización de una medida. Al fin y al cabo, ¿para qué hacer ciencia, si no para entender el mundo?

Para obtener una imagen coherente del mundo físico necesitamos combinar la física con la filosofía. Ambas disciplinas se complementan. La metafísica aporta distintos marcos ontológicos del mundo material, pero, más allá de las cuestiones de consistencia interna, no puede decidir entre ellos. La física, por su lado, carece de una explicación coherente para las cuestiones fundamentales, como la definición de los objetos, el papel de su individualidad, el estatus de las propiedades, las relaciones entre objetos y propiedades, o la importancia del espacio y el tiempo.

La unión de ambas disciplinas resulta de particular importancia en aquellos momentos en que los físicos se disponen a revisar los cimientos de su campo. En el pasado, el pensamiento metafísico guió a Isaac Newton y a Albert Einstein. Hoy, está influyendo a muchos de quienes trabajan para unificar la relatividad general de Einstein con la teoría cuántica de campos. Los filósofos hemos escrito bibliotecas enteras sobre la mecánica cuántica y la teoría de la gravedad, pero solo ahora estamos empezando a explorar la realidad que describe la teoría cuántica de campos. Los nuevos puntos de vista que estamos desarrollando tal vez inspiren a los físicos en su camino hacia una teoría unificada.

PARA SABER MÁS

An interpretive introduction to quantum field theory. Paul Teller. Princeton University Press, 1995.

No place for particles in relativistic quantum theories? Hans Halvorson y Rob Clifton en *Philosophy of Science*, vol. 69, n.º 1, págs. 1-28; marzo de 2002. Disponible en **arxiv.org/abs/quantph/0103041**

Ontological aspects of quantum field theory. Dirigido por Meinard Kuhlmann, Holger Lyre y Andrew Wayne. World Scientific, 2002.

Against field interpretations of quantum field theory. David John Baker en *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 60, n.º 3, págs. 585-609; septiembre de 2009. Disponible en **philsci-archive.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf**

The ultimate constituents of the material world: In search of an ontology for fundamental physics. Meinard Kuhlmann. Ontos Verlag, 2010.

Quantum field theory. Meinard Kuhlmann en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*: **plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory**

BIOINGENIERÍA

UN DELFÍN CON PRÓTESIS

Winter, una cría de delfín, perdió la cola al enredarse en una nasa. Pero los científicos le hicieron una nueva

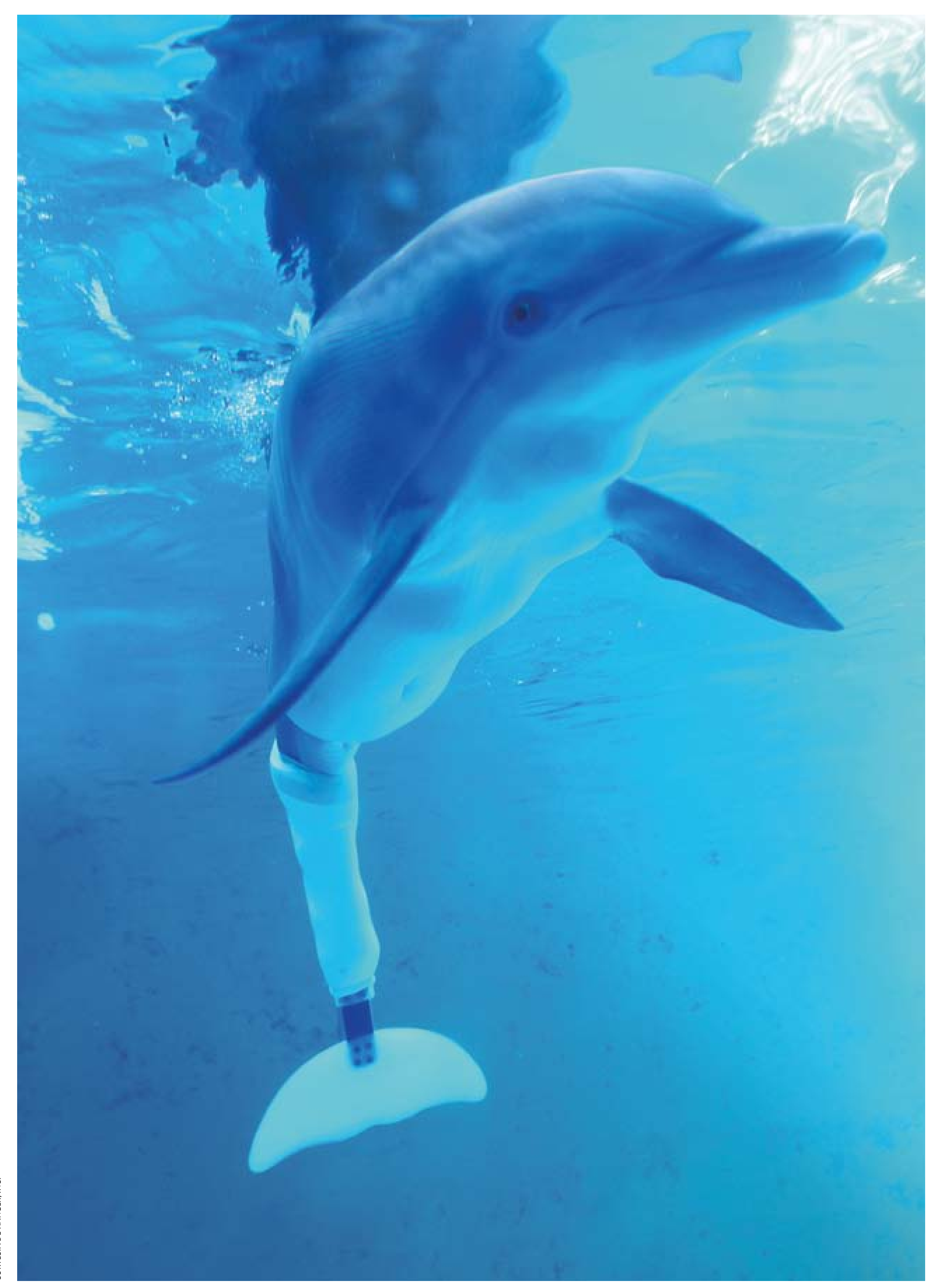
Emily Anthes

En diciembre de 2005, Winter, una cría hembra de delfín, apenas contaba tres meses. Nadaba junto a su madre en Laguna Mosquito, en la costa atlántica del estado de Florida. Pero quedó atrapada en una nasa para cangrejos. Un pescador con vista de águila la vio debatirse y llamó a un equipo de rescate. Estos voluntarios depositaron cuidadosamente a la delfín en unas parihuelas, la sacaron del agua y viajaron de oeste a este a través de Florida, hasta el Acuario Marino Clearwater.

Adaptado de Frankenstein's cat: Cuddling up to biotech's brave new beasts*, de Emily Anthes, por acuerdo con Scientific American/Farrar, Strauss and Giroux, LLC © 2013 Emily Anthes*

Winter llegó al acuario en muy mal estado: agotada, deshidratada y lacerada con mil cortes y abrasiones. Apenas podía nadar; los cuidadores se quedaron en el tanque con ella, sosteniendo su cuerpo en el agua. Nadie podía asegurar si sobreviviría esa noche. Pero la pequeña delfín luchó contra la muerte y consiguió vencerla. Y también la siguiente noche.

Poco a poco, alimentándola con biberones y atendiéndola a todas horas, los cuidadores fueron devolviéndole la vida. Pero cuando empezó a estabilizarse, surgieron otros problemas. Uno de los sedales de la trampa se había enrollado tan fuertemente alrededor de la cola que había cortado su circulación sanguínea. El tejido caudal estaba necrosado; la piel de la delfín empezaba a desprenderse y la cola misma comenzaba



CORTESÍA DE HANGER, INC.

a descomponerse. Un día, los cuidadores descubrieron dos vértebras del animal en el fondo del estanque. Winter estaba recuperando fuerzas, pero sin duda iba a perder la extremidad.

A pesar de todo, había tenido suerte. Había nacido en el siglo XXI, y nunca ha habido mejor momento para los animales mutilados. Una gama de materiales, desde compuestos de fibra de carbono hasta plásticos flexibles, capaces de cambiar de forma, están permitiendo diseñar apéndices artificiales para pacientes de toda especie, ya vuelen, troten o naden. Los protésicos han logrado crear un pico nuevo para un águila, una concha de repuesto para una tortuga y una pata postiza para un canguro.

Mientras que los sensores y las etiquetas identificadoras fijados al cuerpo de animales suministran datos para planes de conservación y pueden contribuir a salvar una especie, las colas y garras artificiales representan una estrategia muy distinta a la hora de ayudar a individuos con mala suerte. No existen prótesis universales para cada animal; de hecho, uno de los problemas con que se enfrentan los especialistas consiste en determinar lo que más conviene a un cuerpo que poco se parece al nuestro. Pero cuando aciertan, sus dispositivos, diseñados y construidos a la medida, ofrecen a los animales la oportunidad de recuperar un miembro y, a la vez, la vida.

MUTILADA

El Acuario Marino Clearwater se ubica en una isla próxima a la costa de Florida en el golfo de México. Unos cuantos peldaños conducen del vestíbulo principal a una plataforma a cielo abierto, donde dos delfines retozan en un enorme tanque. No es difícil localizar a Winter, porque en el lugar de la cola presenta un muñón torcido que pende del torso.

A pesar de la brevedad de su cola, Winter parece sentirse como en casa; se desliza y juega en el agua igual que los cetáceos que la acompañan. Se ha adaptado a su singular cuerpo adoptando técnicas natatorias inusitadas. Los delfines suelen valerse de las aletas pectorales para equilibrarse, pero Winter las usa a modo de remos. Al carecer de las dos piezas planas que componen la aleta caudal, no puede servirse del sistema habitual de propulsión. Así que ha aprendido por sí misma a nadar como los peces, moviendo el cuerpo en el plano horizontal, y no en el vertical, como normalmente hacen los delfines. Por desgracia, la presión que la nueva natación impone sobre la columna vertebral provoca en ella una curvatura anómala.

En los meses que siguieron al rescate de la delfín, los cuidadores empezaron a temer que su singular forma de desplazarse terminaría por causarle lesiones permanentes. En septiembre de 2006, un empleado del acuario aludió a ese temor en una entrevista de la Radio Pública Nacional, que estaba emitiendo un comentario sobre Winter. Casualmente, un protésico llamado Kevin Carroll oyó el programa y pensó que podía ofrecerle una nueva cola al animal.

Carroll se crió en una pequeña ciudad de Irlanda, cerca de un hospital. La visión de niños tullidos entrando y saliendo del centro le inspiró el deseo de reparar el cuerpo humano. En

Emily Anthes es periodista y ha escrito artículos para *Wired, Discover, Slate* y otras publicaciones. Ostenta un máster en periodismo científico del Instituto de Tecnología de Massachusetts y un grado en historia de la ciencia y de la medicina de la Universidad de Yale.



la actualidad es vicepresidente de Hanger, con sede en Austin (Texas), una de las empresas líderes mundiales en protésica. De cuando en cuando, alguien llega a su despacho con un perro tullido o un pájaro sin pico y le pide ayuda. Amante de los animales, a Carroll le resulta imposible denegársela. Con los años ha trabajado con sus colaboradores de Hanger para crear prótesis para una variedad de animales, entre ellos perros, patos y tortugas marinas.

Cuando el acuario accedió a que Carroll intentase colocar a Winter una cola protésica, el experto pensó en la colaboración de un socio para abordar la tarea: Dan Strzempka, protésico de la oficina de Hanger en Sarasota (Florida) y apasionado por el mar y sus criaturas. Él mismo lleva una pierna artificial desde que, a los cuatro años, fue arrollado por un cortacésped.

Carroll y Strzempka han aceptado reunirse conmigo en el acuario para explicarme cómo acometieron la labor. Ambos han pasado un sinfín de horas al borde de la piscina junto a la delfín mutilada. Se trataba de un paciente muy distinto de todos los que habían tratado hasta entonces. Su primera tarea consistió en comprender su organismo. Estudiaron en la bibliografía la anatomía y fisiología de los delfines, y escrutaron en vídeos ralentizados la natación de los cetáceos para comprender su biomecánica. Las prótesis para animales pueden inspirarse en la medicina humana, pero para resolverlas con éxito hace falta no poco ingenio. Saber construir una pierna para una persona amputada no sirve de mucho para hacer lo propio con la pata de un elefante o la de un perro. Cuando se trata de apéndices animales, los protésicos han de ser unos MacGyver (el célebre «manitas» de la serie televisiva homónima), ya que deben diseñarlos y crearlos a la medida del individuo.

En el caso de Winter, el plan básico parecía bastante simple. Carroll y Strzempka decidieron dotarla de una aleta caudal de plástico, acoplada al animal mediante un manguito que se deslizaría sobre los restos de su pedúnculo, la musculosa mitad del delfín que va desde la aleta dorsal hasta la cola. Enseguida comprendieron que la dificultad radicaba en mantener la prótesis en su lugar. Winter, al nadar, aplicaría en la cola una fuerza enorme,

EN SÍNTESIS

Una cría hembra de delfín, llamada Winter, perdió la cola al enredarse en una nasa. Al verse obligada a nadar como un pez, se le deformó la columna vertebral.

Dos protésicos decidieron hacerle a la delfín una cola artificial completa, algo nunca realizado hasta entonces. En el proceso se inventó un gel novedoso.

La cola postiza de Winter está ayudando a enderezar su columna, y la almohadilla de «gel de delfín» ha demostrado ser útil para atletas humanos que han perdido extremidades.

pero al hacerlo, no estaría cargando todo su peso en ella, a diferencia de un humano con una pierna protésica. «El agua constituye un ambiente totalmente distinto», me recuerda Strzempka. Y lo que es más, la piel de los delfines es resbaladiza, sensible y delicada. Y se lacera con facilidad.

Los amputados humanos suelen utilizar en sus prótesis forros suaves o almohadillas para proteger el muñón y la piel de este; Carroll y Strzempka pensaron que Winter necesitaría algo similar. Pero los revestimientos típicos para personas no servían. Tendrían que crear un material nuevo, de suficiente suavidad para preservar la piel de la delfín, lo bastante adherente para mantenerse sujeto sobre una superficie resbaladiza, y capaz de soportar el uso diario en una piscina de agua salada.

Solicitaron la ayuda de un ingeniero químico, quien modificó la composición de un gel amortiguador para prótesis humanas y trató de crear una variante más adecuada para un delfín. Los primeros prototipos eran prometedores, pero su funcionamiento resultaba irregular. Tras varios fracasos, el ingeniero dio finalmente en la diana.

«Se trata de un material extraordinario», me explica Carroll en una de las estancias del acuario. Me acerca una funda del gel, que se parece al látex. Es blanca, blanda, ligeramente gomosa al tacto. Recuerda a un trozo enorme de calamar crudo. Técnicamente corresponde a un elastómero termoplástico, una mezcla de plásticos líquida que puede moldearse de diversas formas al calentarla; pero todos lo llaman «gel de delfín». Carroll, deseoso de mostrarme sus propiedades, agarra el extremo de una pieza de unos sesenta centímetros de longitud y le pide a Strzempka que sujete el otro. Echa a caminar de espaldas: un metro, un metro y medio, tres metros... el material sigue estirándose. Por último, Carroll lo suelta; su extremo latiguea por la sala. Strzempka mantiene el gel en la mano: está como nuevo, ni se ha distendido ni deformado. El gel proporciona también un excelente almohadillado. Carroll lo demuestra envolviéndose la mano con él y golpeándosela furiosamente con un pesado mazo, tras lo cual exhibe, satisfecho, su mano ilesa.

COMO DELFÍN EN EL AGUA

Winter es hoy una feliz portadora de una cola protésica de tamaño natural y anatomía correcta. Para colocársela, un preparador hace equilibrios en una plataforma suspendida sobre el tanque de la delfín. Con una orden rápida, Winter se sitúa en posición, apuntando la cabeza hacia el fondo del tanque y haciendo sobresalir su pedúnculo sobre la superficie del agua. El preparador enrolla un manguito hecho con gel de delfín sobre el muñón de Winter. Después coloca la prótesis propiamente dicha, creada por Carroll y Strzempka tras haber tomado una serie de imágenes y escáneres tridimensionales del cuerpo del animal. La prótesis cuenta con un zócalo flexible, de plástico engomado, que se desliza sobre el revestimiento de gel y abraza los restos del pedúnculo de la delfín. El zócalo termina en una fina tira de fibra de carbono a la que se han atornillado un par de falsas aletas caudales. Todo el dispositivo se mantiene en su lugar por succión.

Aunque la prótesis se inspira en la cola natural del delfín, está construida con toda suerte de materiales artificiales, por lo que es necesario supervisar a Winter mientras la utiliza. Sus cuidadores deben asegurarse de que el dispositivo no empiece a soltarse, o de que no se enganche en algún elemento de la piscina. Así pues, el animal no usa la cola postiza todo el tiempo. Solo la lleva en las sesiones de terapia diaria, en las que los preparadores le hacen realizar una serie de ejercicios ideados para crear músculo y reforzar la postura natatoria adecuada. La cola artificial ayuda a que la columna vertebral conserve la forma correcta y, cuando la lleva puesta, Winter ondula su postizo hacia arriba y abajo, como los delfines, y no de un lado a otro, como los peces. La escoliosis de Winter ha mejorado desde que empezó a utilizar el dispositivo. Carroll confía en que la prótesis, combinada con la terapia sistemática, le ayude a disfrutar de una vida larga y saludable.

Pero, por mucho que progrese, Winter tendrá que pasar el resto de su vida en un acuario. Un delfín sin cola, o con una artificial, tiene escasas posibilidades de sobrevivir en su hábitat natural. No hay forma de saber cuántos años de uso constante resistiría la prótesis. Y Winter necesitará seguir en contacto con los preparadores para reforzar la postura natatoria debida y con veterinarios que supervisen la columna vertebral. Carroll y Strzempka siguen creando varias colas al año para Winter, que todavía no ha alcanzado el tamaño adulto, y van retocando el diseño conforme se modifica su cuerpo. Sueñan también con lograr mejoras notables en la prótesis. A Strzempka le encantaría descubrir una manera de incorporar un dispositivo de vacío que extrajera el aire de la cola cada vez que Winter la mueve arriba y abajo. Se obtendría así una prótesis con un sellado más firme y autoajustable.

> Winter se ha convertido en embajadora de las prótesis

La cola de Winter se ha vuelto célebre. Se han publicado libros, videojuegos y documentales sobre ella, y Warner Brothers lanzó en 2011 una película en 3D basada en su historia, titulada *La gran aventura de Winter*. El sitio web del acuario, y su tienda de regalos, rebosan de objetos sobre el tema, con camisetas, postales, imanes y delfines de juguete que también han perdido la cola.

Pero Winter se ha convertido en mucho más que una poderosa empresa comercial. Se ha vuelto una embajadora de las prótesis. Al correrse la voz sobre el gel de delfín, los protésicos empezaron a solicitarla para sus pacientes humanos. El material, que se adhiere a la piel mejor que los revestimientos habitualmente empleados en las personas, ha demostrado ser de especial utilidad en atletas mutilados, cuyos miembros auxiliares empiezan a soltarse cuando sudan. Strzempka, golfista apasionado, es un converso al gel desde la primera vez que lo utilizó para su pierna artificial. «Su adherencia supone una gran ventaja, especialmente en climas cálidos. Y si uno hace 36 hoyos diarios, la piel se vuelve resbaladiza como la de un delfín», comenta. La empresa Hanger no tardó en empezar a vender revestimientos WintersGel a todo el mundo, desde avezados triatletas hasta chiquillas de 11 años. «Los animales nos devuelven mucho a todos», concluye Carroll, «tanto es lo que aprendemos al trabajar con ellos».

PARA SABER MÁS

Winter's tale: A dolphin in distress. John Barry en *Tampa Bay Times*, 7 de diciembre de 2008. **www.tampabay.com/features/humaninterest/article927462.ece**

Winter: The dolphin that could! Documental producido y dirigido por David Yates y Steve Brown. Disponible en DVD. Clearwater Marine Aquarium, 2010.



Régis Meyran, doctor por la Escuela de Altos Estudios en Ciencias Sociales de París, es antropólogo e historiador de la antropología.

ANTROPOLOGÍA

¿Se halla la cultura en los genes?

La sociobiología, disciplina surgida en Estados Unidos en la década de los setenta del siglo XX, afirma que conductas humanas como la violencia o el altruismo se hallan controladas por genes. La idea ha suscitado, y todavía lo hace hoy, fuertes críticas

Régis Meyran

El pasado 22 de febrero, el antropólogo estadounidense Marshall Sahlins anunció su dimisión de la Academia Americana de Ciencias debido a la elección, en la misma institución, de otro antropólogo, Napoleon Chagnon. Sahlins siempre se ha opuesto a las tesis de este autor de superventas, especialista en los yanomamö de la Amazonía. Al propio tiempo, Chagnon publicaba un nuevo libro titulado *Noble savages* («Nobles salvajes»), en el que volvía a las tesis provocadoras que lo hicieron famoso, haciéndose pasar por víctima de críticas injustas por parte de la «feroz tribu de los antropólogos». Se desató entonces un vivo debate entre los antropólogos estadounidenses. De hecho, este argumento *ad hominem* esconde sobre todo un importante reto científico: el reconocimiento académico de una corriente controvertida aparecida en los años setenta, la sociobiología, que trata de explicar la cultura por los genes y que tiene en Chagnon a uno de sus líderes actuales [*véase* «Napoleon Chagnon: Un antropólogo controvertido», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, mayo de 2001].

EN SÍNTESIS

Desde que se conoce la existencia de los genes y su papel en la evolución, la cuestión de si la cultura está determinada genéticamente ha centrado numerosos debates. Si bien se acepta la existencia de una coevolución de genes y cultura, no hay acuerdo en los mecanismos de esta relación.

La sociobiología, según la cual el comportamiento social humano está determinado por la biología, propone una coevolución guiada por los genes. Prácticas violentas como la guerra responderían a ventajas adaptativas.

Para la sociología y la antropología, en cambio, habría que buscar las raíces de la agresividad y los comportamientos no igualitarios en factores históricos y culturales.



DURANTE LA CEREMONIA DE LOS MUERTOS que celebran los yanomamö, guerreros en traje tradicional desfilan lanzando gritos guturales en honor de los difuntos. Al alba, toda la tribu comerá las cenizas de los fallecidos. En la fotografía, un yanomamö armado con su arco para cazar. Basándose en su estudio sobre este pueblo de la Amazonía, Napoleon Chagnon sostiene que la violencia es una ventaja adaptativa seleccionada en el transcurso de la evolución humana.

CORTESÍA DE JACEK PAŁKIEWICZ

En los medios de comunicación estadounidenses, Chagnon se mueve fácilmente como un moderno Indiana Jones que se ha enfrentado a los peligros de la selva amazónica para escribir una monografía, *Yanomamö: The fierce people* («Los yanomamö: Un pueblo fiero», 1968), con un millón de ejemplares vendidos. En el ámbito científico, son sus ideas sociobiológicas las que provocan discordia: ¿justificarían la guerra por la biología? En 1988, en la revista *Science* describió que entre los yanomamö, cualquier hombre que hubiese matado a otro hombre (cualquier *unokai*) tendría una ventaja adaptativa sobre los no *unokai*. Chagnon intenta establecer que la violencia corresponde a un elemento de adaptación para la especie humana, un carácter genético seleccionado a lo largo de la evolución. Según él, hay dos tipos de competencia entre individuos: una somática (que depende de la capacidad física individual para sobrevivir) y otra reproductiva (relacionada con la descendencia engendrada). Un *unokai* saldría vencedor en ambos terrenos: en el somático, él y su núcleo familiar son menos atacados por otros, debido al efecto disuasorio que produce su ferocidad aparente; en el reproductivo, el *unokai* genera de promedio tres veces más hijos que los que nunca han matado (4,91 hijos frente a 1,59).

Ese artículo dista mucho de ser aceptado unánimemente por los antropólogos. Brian Ferguson, profesor de antropología en la Universidad Rutgers, hizo una crítica mordaz de las tesis de Chagnon. Sus conclusiones no serían válidas debido a un error clásico en el razonamiento: una correlación no es necesariamente una causalidad. En la Amazonía, los jefes son todos *unokai*; gracias a su estatus elevado, tienen más mujeres e hijos que el resto. Ahora bien, Chagnon se interesó por un grupo en el que el líder tenía 11 mujeres y 43 hijos. Este gran número de hijos, que puede atribuirse a un estatus social particular, puede haber aumentado la diferencia entre los *unokai* y los no *unokai*. Y aunque esta diferencia reproductiva fuese correcta, no demostraría en modo alguno que la violencia constituya una ventaja adaptativa: se podría justificar con el argumento cultural (no biológico) contrario, según el cual en la cultura yanomamö la guerra tiene su recompensa en el sexo. Por último, concluye Ferguson, si la violencia estuviese controlada genéticamente en todos los humanos, se observarían disposiciones agresivas diferentes según las poblaciones estudiadas (continente, país, región, etcétera). Pero esto no es así.

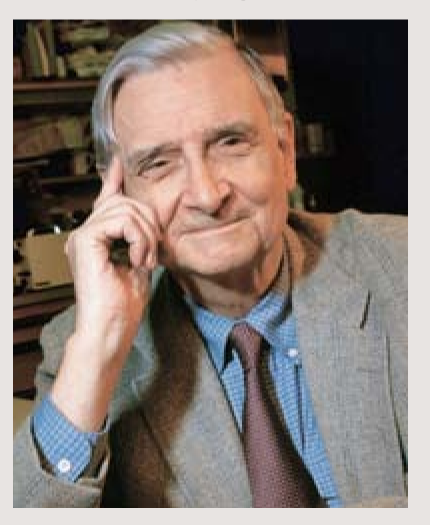
DEL DARWINISMO A LA SOCIOBIOLOGÍA

Esa disputa centrada en la obra de Chagnon es emblemática del debate que sacude la antropología desde que se conoce la existencia de los genes y su papel en los mecanismos de la evolu-

Genes y guerra

A lo largo de la historia, las guerras han sido frecuentes entre las tribus y casi universales entre los reinos y estados. [...] Los principales reinos y estados de Europa y el Medio Oriente eran derrocados fácilmente y la conquista a menudo era más parecida a un genocidio. La propagación de los genes siempre ha tenido una importancia considerable. [...] [Darwin, Keith Bigelow y Alexander] consideraron que algunos de los rasgos «más nobles» de la humanidad, incluido el juego en equipo, el altruismo, el patriotismo, la valentía en el campo de batalla, etcétera, eran el producto genético de la guerra.

Si a ello añadimos el postulado adicional de un efecto umbral, es posible explicar por qué el proceso ha operado exclusivamente en la evolución humana. Si un mamífero depredador social alcanza cierto nivel de inteligencia, como los homínidos primitivos, [...] un grupo sería capaz de evaluar conscientemente la importancia de los grupos vecinos y tratar con ellos de una manera inteligente y organizada. Un grupo podría entonces desalojar a otro cercano, apropiarse de su territorio y aumentar su propia representación genética en la metapoblación. [...] Una capacidad cultural primitiva como esa habría sido posible gracias a la posesión de determinados genes.



Edward Wilson
Sociobiology: The new synthesis, *1975*

ción: ¿está la cultura determinada por los genes? Para delimitar los objetivos de esta pregunta, tema central de la sociobiología, hay que situar la sociobiología en la historia de la biología y las ciencias sociales desde hace 150 años.

Los avances en las ciencias de la vida se han desarrollado en varios niveles. Desde 1859, fecha de la publicación de *El origen de las especies*, hasta su muerte, Charles Darwin construyó una teoría de la evolución de las especies por la acumulación de ventajas adaptativas. Según él, cuando varias especies conviven en un mismo espacio natural, la expansión de cada una de ellas se halla limitada por la lucha entre individuos de la misma especie así como entre especies distintas y, en general, por el enfrentamiento con el entorno natural. Esta lucha por la vida llevó a Darwin a la hipótesis de la selección natural, según la cual solo sobreviven los individuos dotados de los rasgos más ventajosos.

En los años veinte del siglo xx, bajo la influencia de las leyes de la herencia del monje checo Gregor Mendel (1822-1884) y de las ideas de biólogos como el botánico holandés Hugo de Vries, el estadounidense Thomas Morgan propuso, a partir de sus trabajos con la mosca *Drosophila*, la teoría del gen como vehículo de la herencia. En la década de los treinta, una nueva corriente de pensamiento, la teoría sintética de la evolución, agrupó los logros del darwinismo, la genética oficial de Morgan y la genética de poblaciones (según este aspecto estadístico de la teoría de Morgan, toda población aislada constituye un reservorio de genes con características propias). El marco explicativo general propuesto por la teoría sintética de la evolución sigue vigente en la actualidad. Por último, el vehículo de los genes, el ADN, fue descubierto en 1944 y la biología molecular se desarrolló en la década de los sesenta. Se impuso entonces la teoría del código genético, de la replicación del ADN y de la síntesis de las proteínas.

En esta historia, la ciencia natural de los humanos ha ocupado siempre una posición especial. Mientras que Darwin estaba interesado sobre todo en los animales no humanos y aplazó la aplicación de sus teorías al hombre hasta 1871, este tipo de investigación era dominio exclusivo de la llamada antropología física. Esta disciplina se centraba en el estudio de las razas humanas a partir de la medida del cráneo, después por las características de la sangre, e incluía de manera lateral fenómenos culturales (lenguaje, costumbres, etcétera).

Después de la Segunda Guerra Mundial, la antropología física se dividió en la antropología biológica, que tiene en cuenta los resultados de la genética de poblaciones y la teoría sintética de la evolución, y la antropología social y cultural. Surgida de la etnología de los años treinta, esta última deja de interesarse por los factores físicos: el ser humano es una página en blanco sobre la que se imprime la cultura.

Por último, además de esta gran separación en el estudio de los grupos humanos, una corriente de pensamiento fundada por el filósofo inglés Herbert Spencer (1820-1903), el darwinismo social, trató de explicar el comportamiento humano mediante la «supervivencia del más apto». El darwinismo social, contra el que Darwin protestó públicamente, engendró la eugenesia, teorizada por Francis Galton (primo de Darwin); esta se oponía a las leyes sociales para que las leyes de la evolución pudiesen aplicarse libremente a los humanos y «mejorasen» así las razas humanas.

¿COEVOLUCIÓN DE LOS GENES Y DE LA CULTURA?

Desacreditados por las abominaciones nazis, el darwinismo social y la eugenesia han desaparecido gradualmente del panorama científico; pero en la década de los setenta, una nueva corriente, la sociobiología, hizo suya la pregunta sobre la relación entre genes y cultura. En esa época, resultaba banal afirmar que los humanos poseen una capacidad mental determinada por la evolución, que les predispone para la lengua o para la vida social. Más bien lo que se preguntaba era cómo se articula la cultura con el determinismo genético.

Desde los años ochenta, numerosos investigadores afirman la existencia de una «coevolución» de genes y cultura: la evolución de los genes humanos ha hecho posible la aparición de hechos culturales, que a su vez han tenido un impacto en la evolución de los genes. La idea se halla presente en la genética de poblaciones, en la sociobiología y en la lingüística, pero bajo esta formulación común subyacen concepciones opuestas de la relación entre los genes y la cultura.

JIM HARRISON/PLOS

Para el italiano Luigi Luca Cavalli-Sforza, experto en genética de poblaciones, y el lingüista australiano Nicholas Evans, los grupos humanos han ocupado nichos ecológicos distintos gracias a su capacidad de adaptación desatada por la innovación cultural; además, la plasticidad del cerebro (una dotación genética) ha permitido la transmisión de información esencial mediante la cultura; a su vez, la cultura ha influido en las características genéticas del grupo. En 10.000 años, una coevolución entre la adopción del pastoreo y el aumento de la tolerancia a la lactosa habría permitido a los humanos consumir la leche de las vacas que criaban. Sin embargo, esta idea ha sido criticada por otros investigadores, como el biólogo evolutivo Richard Lewontin, para quien la cultura no evoluciona de la misma manera que los seres vivos: la analogía entre los cambios culturales y la evolución darwiniana no se ha estudiado lo suficiente para ser aplicada.

Los sociobiólogos, por su parte, proponen una coevolución guiada por la genética, ya que, según ellos, el comportamiento social de los humanos está determinado por los genes. Esta tesis, sintetizada en 1975 por el entomólogo estadounidense Edward Wilson, profesor de Harvard, en un libro de éxito mediático rotundo, *Sociobiology: The new synthesis*, fue criticada por muchos antropólogos culturales y biólogos. Según ellos, la sociobiología es una nueva forma de darwinismo social: contradice las ideas de Darwin y la teoría sintética de la evolución al defender una explicación evolutiva de las más especulativas, no aplicable a los humanos, por ser demasiado simplista. Sin embargo, fue el nacimiento de una nueva corriente de pensamiento que tendría muchos imitadores y pretendía reformar de arriba abajo tanto las ciencias de la vida como las sociales.

Sus hipótesis, empezando por la idea de que todo comportamiento se reduce a su dimensión biológica, constituyen algunos de los puntos más controvertidos de la sociobiología. Al pretender no realizar ningún juicio moral, los sociobiólogos suponen que ciertas variaciones genéticas son responsables de algunos rasgos del carácter como el conformismo, la malicia o la homosexualidad. Eso fue refutado especialmente por el paleontólogo estadounidense Stephen Jay Gould desde 1977, en su libro *Desde Darwin: reflexiones sobre historia natural*: «¿Qué prueba directa tenemos de que el comportamiento social humano se halle bajo el control de los genes? Por ahora, la respuesta es: ninguna». La idea de que un gen condicione una característica humana solo se ha establecido en el marco de la producción de proteínas específicas. Para otras características humanas, desde la estatura al comportamiento, suponiendo que sea posible descomponerlas en rasgos distintivos, se trata más bien de un ejército de genes que interaccionan, en combinación con el entorno cultural; interacciones para las que no hemos podido establecer un modelo. Los discípulos de E. Wilson refutaron en bloque estas críticas; según ellos, provenían de pensadores marxistas que rechazaban cualquier idea de la naturaleza humana, y afirmaron que el reduccionismo constituye el método científico por excelencia.

Pero la mayor parte de las críticas se refieren a comportamientos esgrimidos como argumentos por los sociobiólogos: la violencia, el altruismo o los roles de género de hombres y mujeres. ¿La violencia humana es natural? Esta pregunta sigue siendo objeto de acalorados debates. Los sociobiólogos desarrollan una filosofía de la naturaleza humana violenta, una visión guerrera de las relaciones entre los individuos y de la violencia como el principal motor de la evolución. Según el filósofo Jacques Ruelland, Wilson se inspira en el concepto de «lucha por la existencia» de Darwin, pero la ha entendido mal al tomarla al pie de la letra (la lucha de cada individuo contra los otros para sobrevivir), mientras que, para Darwin, este concepto tiene un valor metafórico: describe el éxito de la descendencia de una especie.

Wilson se inspira en el fundador de la etología, el austriaco Konrad Lorenz (1903-1989), quien afirmó que los animales, incluidos los humanos, poseen un instinto innato que los lleva a la agresión. Para Lorenz, la agresividad constituye una de las bases de la evolución humana: en condiciones naturales, contribuye a la conservación de la vida y de la especie. La agresividad es, pues, una explicación de las guerras y los conflictos, que puede ser dirigida hacia formas inofensivas cuando se canaliza en un deporte, por ejemplo.

Wilson va más allá y plantea que la guerra corresponde a un factor de selección natural entre los grupos humanos; para ello evoca el «sentimiento de la verdadera alegría biológica de la guerra». También afirma que la discriminación social es natural en el hombre, porque la «jerarquía» permite a los más fuertes tener un mejor acceso a los alimentos y a las mujeres. Para los sociólogos, las prácticas violentas y no igualitarias tienen un origen en situaciones históricas y culturales; puesto que no tienen la misma magnitud según el lugar y la época, no podemos relacionarlas con una supuesta «naturaleza humana».

Los sociobiólogos no ofrecen una respuesta clara a estas críticas, que prefieren ignorar puesto que a sus ojos emanan de izquierdistas imbuidos de la fe de Rousseau en la bondad humana. Sobre este punto, no siempre se equivocan: antropólogos como Margaret Mead y Ashley Montagu pueden haber idealizado las cualidades pacifistas de las poblaciones que estudiaron. Pero, como señaló el epistemólogo Patrick Tort, el propio Darwin había propuesto un argumento que se opone al determinismo ge-

GLOSARIO

Darwinismo: Término que designa la teoría de la selección de Darwin, según la cual las especies evolucionan por acumulación de ventajas adaptativas.

Genética de poblaciones: Disciplina que estudia la presión evolutiva que se ejerce en el conjunto de genes de una población aislada.

Teoría sintética de la evolución: Teoría que reúne las teorías darwiniana y genética, y la genética de poblaciones.

Darwinismo social: Corriente de pensamiento surgida al margen del darwinismo que intentaba explicar los comportamientos humanos por la supervivencia del más apto.

Antropología social y cultural: Corriente de pensamiento que estudia al hombre sin tener en cuenta sus características biológicas.

Antropología biológica: Corriente de pensamiento que incluye la genética de poblaciones y la teoría sintética de la evolución.

Sociobiología: Corriente de pensamiento que afirma que la cultura está determinada por los genes.

Psicología evolutiva: Disciplina que pretende explicar los rasgos psicológicos mediante la teoría de la evolución.

nético de los sociobiólogos: la cultura puede contrarrestar la selección natural, ayudando a los más pobres, por ejemplo, con la invención de las leyes sociales.

El debate sobre la justificación del individuo altruista cristalizó cuando la idea de la selección de grupo apareció en la genética de poblaciones. En 1962, el zoólogo británico Vero Wynne-Edwards propuso que una población aislada formaba un grupo, una «unidad genética» sometida a una presión de selección y al cambio evolutivo. En este contexto, el altruismo resultaría de la selección natural para preservar los genes del grupo. El altruismo explicaría el sacrificio de una abeja por su colmena.

Después de haber criticado este principio, Wilson lo adoptó y lo aplicó a los grupos humanos, como la tribu o la nación. Si el hombre está dispuesto a sacrificarse para que su grupo sobreviva, ello justifica el patriotismo o la valentía en el combate, formas de altruismo que hacen de la guerra un producto genético. Y si la selección no elimina a los homosexuales (cuya condición se supone determinada genéticamente) es porque pueden desempeñar un papel de auxiliares del hogar, otra forma de altruismo.

Otros sociobiólogos, sin embargo, se oponen —como la mayoría de los biólogos— a esta teoría de la selección de grupo y toman partido por la teoría contraria, la selección individual, ya que, según Darwin, la selección se realiza mediante el sesgo del individuo. Esto no impide que vean el altruismo como una ventaja adaptativa. Según el sociobiólogo Richard Dawkins, la finalidad del ADN es la «automaximización» a través del cuerpo, que es su receptáculo (teoría del gen egoísta). El altruismo serviría a esta finalidad mediante una «selección de parentesco»: cuando un animal se sacrifica, sus «parientes», cercanos genéticamente, se aprovechan de ese sacrificio al quedar vivos, lo que conserva una gran parte del patrimonio genético del individuo sacrificado. Para Sahlins, una comprensión tal de la selección individual no es más que la transposición, en el plano genético, de la metáfora económica del individualismo empresarial.

SEXO, HORMONAS Y AGRESIVIDAD

El último escollo corresponde a la diferenciación de los roles sexuales entre hombres y mujeres, determinados genéticamente según los sociobiólogos. En los años setenta del siglo xx, David Barash escribe que la actividad sexual fuera del matrimonio resultaría más ventajosa desde el punto de vista evolutivo para el hombre: a este, que sufre la incertidumbre de la paternidad, le interesa multiplicar sus conquistas para difundir sus genes, mientras que a la mujer, que invierte más en la reproducción, le interesa concentrarse en la prole. Por tanto, la tendencia natural del hombre sería ser dueño de un «harén», mientras que la mujer, sumisa, buscaría la protección de un hombre. Y la división sexual de las tareas del hogar (el hombre en el trabajo, la mujer en casa) sería también una herencia evolutiva que se remontaría a los cazadores-recolectores.

Para Wilson, la diferencia en el comportamiento (heredado genéticamente) entre los sexos se expresaría sobre todo en el grado de agresividad, debido a la función de las hormonas sexuales masculinas (testosterona) y femeninas (estrógenos). Ello explicaría por qué los hombres son naturalmente más agresivos y tienen más responsabilidades políticas y profesionales. Para la socióloga estadounidense Barbara Chasin, estos argumentos convierten la sociobiología en una pseudociencia que justifica las desigualdades sociales: los resultados que vinculan la agresividad con las hormonas en ratas y monos no se pueden extrapolar a los humanos, que han aprendido a controlar sus comportamientos instintivos mediante la integración de normas culturales cada vez más complejas.



EN SU OBRA ***Das sogenannte Böse. Zur Naturgeschichte der Aggression*** **(1963) («Sobre la agresión: El pretendido mal», 1966), el zoólogo austriaco Konrad Lorenz, fundador de la etología, defendía que en los animales y en el hombre la agresividad es un instinto. Esta idea, que suscitó vivas polémicas, constituye uno de los pilares de la sociobiología.**

Actualmente, aunque criticada por biólogos y antropólogos, la sociobiología existe aún en la antropología estadounidense, en especial bajo la forma de una disciplina muy presente en las universidades: la psicología evolutiva. Esta última tiene como objetivo explicar los mecanismos del pensamiento humano a partir de la teoría de la evolución. Incluye las principales tesis de la sociobiología, como la determinación genética del comportamiento en función del sexo.

En Europa, podría decirse que la sociobiología no ha ido más allá de algunos grupos de zoólogos. Con todo, en las neurociencias sociales hallamos temas a los que los sociobiólogos dan una gran importancia, como la investigación de los mecanismos neurohormonales (determinados genéticamente) del racismo, la violencia, la capacidad de liderazgo, la empatía o la moral. Una vez más, los resultados de la investigación en sociología, antropología social e historia no suelen tenerse en cuenta. Esto hace que algunos sociólogos reaccionen de manera radical: para Alain Ehrenberg, las neurociencias sociales desarrollan una concepción fantasiosa de la relación social. La reciente controversia sobre Chagnon es solo la parte más visible de una guerra ideológica subterránea entre dos clanes rivales irreductibles, y cuyo resultado sigue siendo incierto. Una resolución pacífica de este conflicto podría venir, en cualquier caso así lo esperamos, de un mejor diálogo entre las ciencias naturales y las sociales.

PARA SABER MÁS

Sociobiología. La nueva síntesis. E. O. Wilson. Ediciones Omega, Barcelona, 1980.
Uso y abuso de la biología: Crítica antropológica de sociobiología. Marshall D. Sahlins. Siglo XXI de España Editores, 1990.
El gen egoísta. R. Dawkins. Salvat Editores, Barcelona, 2002.
¿Quiénes somos?: Historia de la diversidad humana. L. L. Cavalli-Sforza. Editorial Crítica, Barcelona, 2009.
L'Empire des gènes. Histoire de la sociobiologie. J. G. Ruelland. Les Éditions de l'École Normale Supérieur, 2004.
Noble Savages, my life among two dangerous tribes. N. Chagnon. Simon & Schuster, 2013.

por Andrew Berry



Andrew Berry es profesor de biología evolutiva y de los organismos en la Universidad Harvard y editor de la antología de la obra de Wallace *Infinite Tropics*.

Wallace, el evolucionista radical

En el centenario de su muerte, repasamos la trayectoria de este científico visionario, explorador atrevido y socialista apasionado

Alfred Russel Wallace figura en demasiadas historias como el acicate de Charles Darwin. Las dudas de Darwin ante la publicación de sus hipótesis sobre la evolución a través de la selección natural se disiparon al recibir un manuscrito de Wallace, enviado desde Indonesia, que esbozaba esas mismas ideas. El 1 de julio de 1858 se presentaron de forma simultánea a la Sociedad Lineana de Londres sendos artículos de Darwin y Wallace sobre la teoría. Al año siguiente, la publicación por Darwin de *El origen de las especies* la difundiría entre el público.

El mayor logro científico de Wallace le condenó a desempeñar el papel de Watson, mientras Darwin se reservaba el de Holmes. El propio Wallace promovió esta apreciación: en 1889 tituló *Darwinismo* su obra magna sobre evolución, y en 1908, al conmemorarse los cincuenta años de la presentación de la teoría ante la Sociedad Lineana, minimizó su contribución: «Yo era en aquel tiempo, como lo he sido con frecuencia desde entonces, el "joven impaciente"; él [Darwin], un estudioso calmo y laborioso en busca de la plena demostración de la verdad que había descubierto, un investigador al que la fama personal inmediata traía sin cuidado».

Sin embargo, su estatus marginal no hace justicia a la contribución de Wallace, científico visionario por derecho propio, explorador atrevido y socialista apasionado. Los congresos y exposiciones con los que se ha conmemorado este año el centenario de su muerte en 1913 nos ofrecen la oportunidad de revisar su gran legado científico. Wallace no solo descubrió la selección natural y definió el término especie, sino que fundó el campo de la biogeografía evolutiva y fue pionero de la historia natural comparada.

Aprendiz en el Amazonas

Wallace nació en 1823 en el seno de una familia modesta. A los trece años dejó



ENGLISH HERITAGE

la escuela para convertirse en ayudante de su hermano agrimensor. El trabajo sobre el terreno despertó en él un temprano interés científico por las plantas. En 1844, Henry Walter Bates, naturalista autodidacta como él, que daría nombre al mimetismo batesiano, le introdujo en el coleccionismo de escarabajos y le ayudó a madurar como investigador. En 1847, no contento con disponer de una «colección meramente local», Wallace propuso a Bates «coleccionar y estudiar a fondo una familia entera, a fin de arrojar luz sobre el origen de las especies».

Los dos neófitos partieron audazmente hacia el Amazonas brasileño en 1848. Wallace pasaría allí cuatro años; Bates once. Su expedición científica se financió a través de la venta de especímenes.

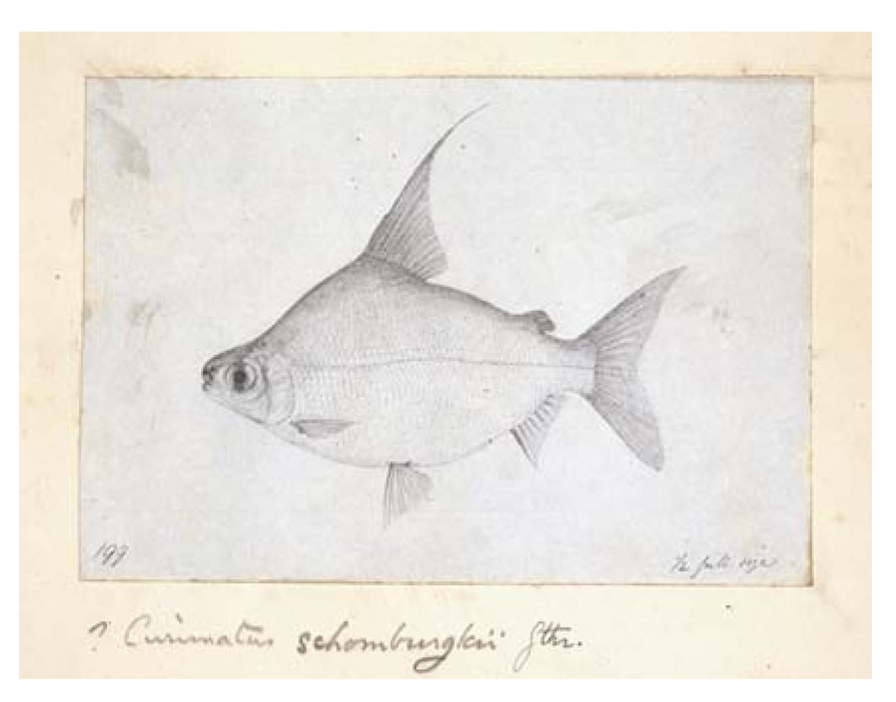
Wallace se dispuso a regresar a Inglaterra en 1852. Debido a un problema aduanero, muchos de los especímenes que había ido enviando a Londres se encontraban retenidos en Manaos, en la confluencia del Amazonas y el Río Negro. Wallace navegó río abajo hasta la desembocadura en Belén, junto con el fruto de años de trabajo en la selva: una colección de animales vivos que había transportado a través del continente. Sin duda fantasearía sobre el impacto de su llegada a Londres, y puede que se imaginara entrando en un salón científico victoriano con un tucán sobre el brazo.

Pero esa escena no llegó a producirse. En mitad del Atlántico el barco se incendió y ardió como una caja de cerillas. Wallace solo logró rescatar unos dibujos, antes de protagonizar una de las escenas más amargas de la historia de la ciencia. Se quedó, junto a la tripulación, cerca de los restos ardientes del naufragio, con la esperanza de que atrajeran a otros barcos. Pero nada pudo hacer por los exóticos animales, que hubieran sido su pasaporte a la fama científica en Londres: «Muchos de los loros, monos y otros animales a bordo ya se habían carbonizado o asfixiado; otros se habían refugiado de las llamas en el bauprés, ajenos al destino que les esperaba».

Pasaron diez días antes de que los rescataran. Wallace afrontó la espera con entereza victoriana: «Durante la noche vi varios meteoros; de hecho no hay mejor lugar para observarlos que un pequeño bote en mitad del Atlántico».

Tras perderlo casi todo, pero decidido aún a abrirse camino como naturalista, Wallace zarpó de nuevo en 1854 rumbo a Singapur, punto de partida de su segunda serie de extraordinarias exploraciones. Si en el Amazonas se había formado como científico, los ocho años que pasaría en el sudeste asiático iban a constituir «el episodio central y decisivo de mi vida», como escribiría más tarde.

Wallace viajó entre la península de Malasia y Nueva Guinea Oriental. Esta vez, tras vivir aventuras peligrosas a bordo de pequeños botes en archipiélagos remotos, sus colecciones llegaron íntegras a Inglaterra, con un millar de nuevas especies. A su regreso a la metrópolis en 1862, Wallace pertenecía ya a la élite científica. El flujo constante de especímenes había causado sensación entre coleccionistas ávidos e instituciones como el Museo Británico. Una serie de artículos innovadores, redactados sobre el terreno y leídos ante la Sociedad Lineana, le había consagrado también como biólogo teórico.



UNO DE LOS POCOS DIBUJOS realizados en el Amazonas que Wallace rescató de su barco en llamas en 1852.

Debut científico

El naufragio de Wallace en el Atlántico propició que completara su formación biogeográfica con una segunda expedición. Como coleccionista, Wallace estaba interesado en la distribución de los animales: necesitaba información sobre la localización precisa de cada especie y era sensible a las transiciones geográficas de una especie a otra. En uno de sus primeros artículos del Amazonas, se había quejado de la falta de precisión de los naturalistas al describir las áreas de distribución de las distintas especies de monos.

Wallace tenía una habilidad prodigiosa para discernir patrones en la naturaleza tropical, un mundo tan diverso como aparentemente caótico, en su mayor parte no catalogado. Un habilidad propia del verdadero naturalista: la capacidad de crear una base de datos mental con los animales y las plantas observados, y usarla luego para referenciar formas similares en otros lugares. De ahí su primer intento de generalización biológica, un artículo teórico escrito en 1855 en Sarawak, Borneo: «Sobre la ley que ha regulado la introducción de nuevas especies» (ley de Sarawak).

Fue un debut científico impresionante. Wallace subrayó en cursiva la tesis principal del trabajo: «*Cada especie ha aparecido de manera coincidente, en el tiempo y en el espacio, con una especie preexistente estrechamente relacionada con ella*». En otras palabras, las especies relacionadas entre sí tienden a encontrarse en la misma área geográfica (todos los canguros están en Australasia, por ejemplo); y los fósiles, en estratos contiguos (todos los dinosaurios ceratópsidos pertenecen al final del Cretácico). Wallace descubrió que el origen de las especies correspondía a un proceso genealógico.

Una de las peculiaridades de la ley de Sarawak era que estaba basada en datos publicados. En Borneo, Wallace apenas tenía acceso a fósiles, porque el suelo y la vegetación de los bosques lluviosos tropicales dificultaban el acceso a las formaciones rocosas subyacentes. Tampoco contaba con una buena biblioteca, de modo que tuvo que recurrir a su fenomenal memoria y a los libros sobre el registro fósil que podía acarrear. Los *Principios de geología* de Charles Lyell (1830-1833) fueron su biblia. Darwin advirtió la relevancia del registro fósil a partir de la observación directa sobre el terreno, en Sudamérica; las intuiciones paleontológicas de Wallace, en cambio, surgieron de los libros. Ello hace que los dos volúmenes que Wallace publicó en 1876 sobre *La distribución geográfica de los animales* sean más admirables, si cabe, como síntesis de los datos sobre fósiles y seres vivos.

La habilidad de Wallace para reconocer patrones le llevó a otro concepto fundamental de la evolución. En un brillante artículo de 1865 sobre las Papilionidae, una familia de mariposas del sudeste asiático, Wallace fue capaz de distinguir las variaciones interpoblacionales, intrapoblacionales, y entre especies y subespecies, para alcanzar esta definición: «Las especies son simplemente razas o formas locales muy marcadas, que cuando están en contacto no se reproducen entre sí, y que cuando habitan áreas distintas se cree que se han originado de forma independiente y son incapaces de producir descendientes híbridos fértiles».

Aun así, a la mayoría de los estudiantes de biología se les sigue contando que no fue Wallace, sino Ernst Mayr en 1942, quien introdujo el concepto de especie biológica.

Su conocimiento de los trópicos del Viejo y el Nuevo Mundo permitió a Wallace plantear preguntas a gran escala. ¿Por qué difería tanto la fauna de dos regiones climáticamente similares? El naturalista había sentado las bases de la biogeografía histórica en un artículo de 1857 sobre las islas Aru, en Nueva Guinea oriental: «las especies de Nueva Guinea son totalmente distintas de las de las islas orientales del archipiélago, como Borneo», pese a la similitud de su «clima y características físicas». Wallace observó también que, a pesar del contraste físico entre Australia y Nueva Guinea, «las faunas de ambas regiones, aun constando de especies distintas, muestran un carácter muy similar». Si Borneo y Nueva Guinea hubieran estado geológicamente conectadas, sus faunas serían también semejantes.

Partiendo de esas observaciones, la ley de Sarawak afirmaba que la distribución de las especies respondía, en parte, a las condiciones ambientales (algunos árboles, por ejemplo, son especialistas tropicales), pero, sobre todo, a los avatares históricos. Este argumento culminó en *La distribución geográfica de los animales*. De haber vivido hasta los años sesenta del siglo xx, Wallace habría visto cómo la teoría de la deriva continental vindicaba sus ideas: Australia y Nueva Guinea se hallan sobre una misma placa tectónica, Borneo sobre otra.

Una conexión afortunada

Resulta tentador buscar paralelismos entre la azarosa trayectoria vital de Wallace y su interpretación contingente de los sistemas naturales. Su mayor descubrimiento biogeográfico también conllevó una dosis de suerte. En 1856, tras perder un enlace en la ruta a Sulawesi, Wallace pasó un par de meses en las islas de Bali y Lombok; allí observó grandes diferencias entre la vida

silvestre de una y otra, pese a que las separaban solo 35 kilómetros. Si hacia el sur y el este dominaba la fauna australiana, hacia el norte y el oeste lo hacía la asiática. Wallace había identificado una antigua línea divisoria biogeográfica a lo largo del sudeste asiático, que el biólogo Thomas Henry Huxley bautizaría como «línea de Wallace».

El descubrimiento de la selección natural en 1858 resultó de la unión de todos esos cabos. Convaleciente de unas fiebres en las islas Molucas, Wallace reflexionó sobre otra discontinuidad biogeográfica, la que separaba a los pueblos austronesios del sudeste asiático de los pueblos melanesios de Nueva Guinea. Inspirándose, como Darwin, en la obra del economista Thomas Malthus, fijó su atención en la competencia por los recursos limitados. Teniendo en cuenta los conocimientos de la variación de especies fruto de su experiencia como recolector, la selección natural representó para Wallace un paso lógico.

Wallace se sentía decepcionado por la tibia recepción de su artículo con la ley de Sarawak, una propuesta teórica poco ortodoxa. Su agente en Londres protestó ante el exceso de «teorización» y le recomendó «recopilar más hechos». Para evitar que el artículo sobre la selección natural corriera la misma suerte, Wallace envió el manuscrito a un investigador de prestigio, con la esperanza de recabar su apoyo y ganar visibilidad. El colega escogido fue Darwin. ¿Qué habría ocurrido si Wallace hubiera enviado su artículo directamente a una revista?

Más allá de la evolución

Algunas historias hablan del «otro Wallace», la celebridad científica que se habría entregado a las causas más diversas, desde el sufragio universal y el socialismo al espiritismo y la frenología. Sin embargo, la visión del mundo de Wallace era mucho más coherente de lo que se da a entender. Sus ideas sobre la evolución humana ofrecen un buen ejemplo.

Entre los motivos de desacuerdo entre Wallace y Darwin, el más importante era la evolución humana: Wallace creía que la selección natural no bastaba para explicar el origen de nuestra especie. La idea horrorizaba a Darwin, que en 1869 escribió a su colega: «Espero que no haya matado del todo a nuestro hijo». La actitud de Wallace ante la cuestión respondía a dos factores.

Primero, creía firmemente en el espiritismo. Las sesiones de médiums fraudulentos dispuestos a embaucar al público victoriano eran muy populares entre los librepensadores como Wallace, deseosos de llenar el vacío que había dejado en ellos el abandono de la religión. Wallace intentó incluso convencer a sus colegas de que las fuerzas espirituales no eran detectables científicamente porque la tecnología no había avanzado lo suficiente. ¿Quién hubiera imaginado, antes del descubrimiento del microscopio, que una gota de agua del Támesis bulliría de microorganismos? Como espiritista, Wallace creía que un agente no material había intervenido en la génesis de la especie humana.

La otra razón por la que creía que la selección natural no bastaba para explicar la evolución humana era más científica. Tras pasar doce años de su vida entre personas consideradas salvajes por la sociedad victoriana, Wallace, a diferencia incluso de los abolicionistas más radicales, no era racista. «Cuanto más conozco a la gente no civilizada, más estima siento por la naturaleza humana en general, y más se diluyen las diferencias esenciales entre lo que llamamos el hombre civilizado y el hombre salvaje.»

Para Wallace, esa perspectiva social ilustrada planteaba un problema evolutivo. Creía que un isleño de Aru que habitaba una cabaña de arcilla tenía los mismos atributos mentales que un miembro de un club londinense como el Ateneo. Con la formación adecuada, el isleño sería capaz de interpretar a Chopin y declamar a Ovidio; pero este potencial nunca se realizaría en las islas Aru. Muchos humanos poseen habilidades que nunca tendrán la oportunidad de explotar.

Según su razonamiento, esta situación no podría producirse por selección natural, dado que esta promueve solo los rasgos útiles. Concluyó que la evolución humana requería cierta intervención divina. Su argumento revela una excelente apreciación de la mecánica de la selección natural, aunque hoy aceptemos que el cerebro haya evolucionado según la selección natural con finalidades adaptativas específicas, y que muchos de sus atributos —incluida la capacidad de interpretar a Chopin o declamar a Ovidio— sean simples productos secundarios del órgano resultante.

Wallace se implicó con un tesón admirable en causas no científicas. Al margen del juicio que estas nos merezcan, tal pasión hizo de él un prototipo del científico comprometido socialmente. La justicia social es un tema recurrente en sus 20 libros y casi 800 artículos, ya sea en relación con los pobres («Es un crimen permitir que un niño nazca millonario y otro pobre»), las mujeres privadas de derechos («las mujeres son seres humanos; por tanto, debieran poder votar como los hombres»), o los bosques de secuoya californianos, amenazados de extinción («Confiemos en que se tomen pronto las medidas necesarias para preservar zonas más amplias de bosque, antes de que sea demasiado tarde»).

Wallace fue un científico comprometido y productivo hasta el final de su vida. Uno de sus últimos libros, *¿Es Marte habitable?* (Macmillan, 1907), supuso el inicio de la astrobiología. También escribió extensamente sobre la evolución de la coloración animal, en especial sobre el camuflaje, el aposematismo o coloración llamativa, y el mimetismo. Y sugirió que la selección natural puede haber facilitado la especiación al promover la evolución de la inviabilidad o infertilidad de híbridos entre especies incipientes (efecto Wallace). Su contribución más notable, sin embargo, fueron sus síntesis sobre biogeografía evolutiva, *La distribución geográfica de los animales* y *La vida en las islas* (1880), obras pioneras en este campo que dejaron el listón muy alto.

La conmemoración del centenario de la muerte de Wallace brinda una excelente ocasión para recordar sus logros científicos, su capacidad para asumir riesgos y su pasión por las causas en las que creía. Al fin y al cabo, él mismo se describió como un científico y, al propio tiempo, «revolucionario radical, partidario de nacionalizar la tierra, socialista, antimilitarista, etcétera». Es decir, mucho más que el acicate de Darwin.

Artículo original publicado en *Nature* 496, págs. 162-164, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

PARA SABER MÁS

On the law which has regulated the introduction of new species. A. R. Wallace en *Annals and Magazine of Natural History*, vol. 16, págs. 184-196, 1855.

On the natural history of the Aru islands. A. R. Wallace en *Annals and Magazine of Natural History*, vol. 20 (suplem.), págs. 473-485, 1857.

On the phenomena of variation and geographical distribution as illustrated by the Papilionidae of the malayan region. A. R. Wallace en *Transactions of the Linnean Society of London*, vol. 25, págs. 1-71, 1865.

An elusive Victorian: The evolution of Alfred Russel Wallace. M. Fichman. University of Chicago Press, 2004.

Natural selection and beyond: The intellectual legacy of Alfred Russel Wallace. N. A. Johnson, dirigido por C. H. Smith y G. Beccaloni, págs. 114-124. Oxford University Press, 2008.

por Carlos Domínguez Carrió, Jordi Grinyó y Josep-Maria Gili

Agregaciones masivas

Ciertas especies de ofiuras forman agrupaciones que favorecen el desarrollo individual, un comportamiento gregario que debió ser más común en el pasado

Uno de los patrones biológicos más sorprendentes que pueden observarse en la naturaleza corresponde a las agregaciones animales. Estas parecen ser una regla en numerosos grupos: se conocen tanto para organismos microscópicos como para los vertebrados más evolucionados. La teoría ecológica clásica las considera una respuesta evolutiva que favorece a los individuos que las forman, ya que aportan un beneficio claro en términos de información centralizada, protección ante posibles enemigos y mejora de la capacidad de reproducción.

Una de las agregaciones masivas más espectaculares la encontramos en ciertas zonas detríticas de la plataforma continental del Mediterráneo occidental, en profundidades por debajo de los cincuenta metros. Ofiuras de la especie *Ophiotrix quinquemaculata* se agrupan formando poblaciones locales con densidades de hasta centenares de individuos por metro cuadrado, que llegan a ocupar extensiones de varias hectáreas. Este tipo de agregaciones densas pueden considerarse vestigios del pasado, ya que probablemente fueron mucho más conspicuas en épocas geológicas remotas, cuando la presencia de depredadores era menor. Para esta especie de ofiura, vivir de forma agrupada entraña varias ventajas: por un lado, mejora la estabilidad frente a corrientes fuertes, que podrían fácilmente barrer individuos aislados; por otro, aumenta su capacidad de alimentación, ya que la presencia de tantos brazos ralentiza las corrientes dominantes y favorece la deposición de partículas en suspensión, ingrediente básico de su dieta.

Las partículas de alimento son captadas por los pies ambulacrales y la gran cantidad de espinas que poseen en los brazos. De forma periódica, los restos de comida son recolectados en un bolo alimenticio que se desplaza a lo largo del brazo del animal, aumentando de tamaño conforme se acerca a la boca.

—Carlos Domínguez Carrió, Jordi Grinyó y Josep-Maria Gili
Instituto de Ciencias del mar (CSIC)
Barcelona



Las agregaciones de *O. quinquemaculata* **no parecen afectar la fauna sésil que crece en sustratos blandos, a pesar de cubrirla por completo en muchas ocasiones. De hecho, las especies que cohabitan con las ofiuras podrían verse favorecidas por el incremento de materia orgánica que producen estas agrupaciones.**

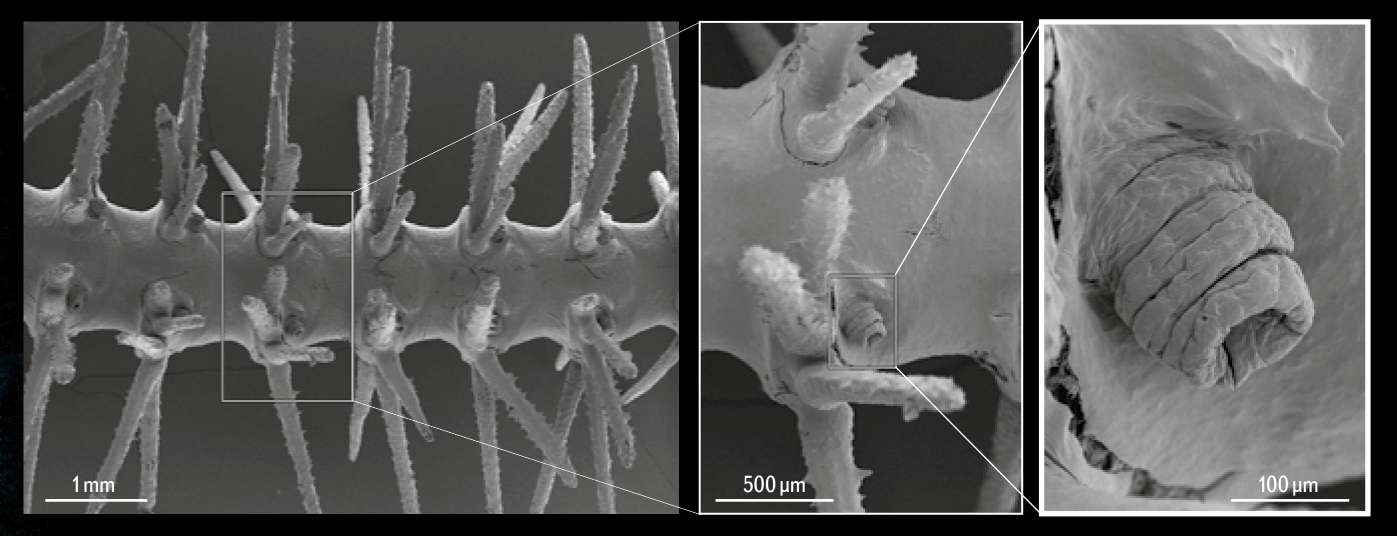


Las agregaciones de ofiuras del género *Ophiotrix* pueden llegar a formar núcleos locales de densidades elevadísimas. *O. quinquemaculata* alcanza valores cercanos a los 100 individuos por metro cuadrado; otras especies de mares más fríos incluso superan los 2000 individuos por metro cuadrado.

Ejemplares del equinodermo *O. quinquemaculata*. Se caracterizan por un disco central muy bien definido y cinco brazos finos repletos de espinas.



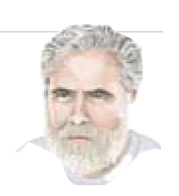
Los individuos de *O. quinquemaculata* utilizan tres de sus brazos para elevar el cuerpo del sustrato y captar las partículas de materia orgánica que transportan las corrientes. Los pies ambulacrales (*derecha*) se extienden para aumentar la eficiencia de captura, a la vez que producen un moco que atrapa las partículas y permite que lleguen con mayor facilidad a la boca.



ICM-CSIC-JAGO-GEOMAR

por George Church

George Church es catedrático de genética en la facultad de medicina de Harvard y director del Centro de Excelencia en Genómica de Harvard adscrito a los Institutos Nacionales de Salud.



Volved a la vida, por favor

Revivir a los mamuts y a otras especies extintas no es ninguna mala idea

Hay autores que defienden con rotundidad que resucitar especies como el mamut lanudo a partir de su ADN es una mala idea. En mi opinión, se trata de un rechazo demasiado precipitado. La propuesta es interesante y merece ser debatida con amplitud de miras y desde una perspectiva multidisciplinar.

La investigación destinada a revivir especies extintas no persigue fabricar copias perfectas ni engendrar ejemplares únicos como reclamo publicitario de un laboratorio o un zoológico. Su objetivo es aunar lo mejor del ADN antiguo y del sintético para adaptar los ecosistemas actuales a los drásticos cambios del medio, como el calentamiento global, y revertirlos si es posible.

Los ecosistemas que dependen de especies clave han perdido la biodiversidad original al evolucionar, pero las condiciones ambientales actuales la hacen necesaria de nuevo. Hace 4000 años, la tundra que cubre Rusia y Canadá era un ecosistema más rico basado en la vegetación herbácea y el hielo. Hoy se está derritiendo y, de seguir así, podría liberar más gases de efecto invernadero que la quema de todos los árboles del planeta. Unas decenas de modificaciones en el genoma del elefante moderno (con el fin de engrosar su capa de grasa subcutánea y dotarlo de un pelaje lanudo y glándulas sebáceas) bastarían para crear una variedad funcionalmente similar al mamut. Devolver esta especie clave a la tundra ayudaría a prevenir algunos efectos del calentamiento.

Los mamuts mantendrían más fría la región por varios motivos: pastarían la hierba seca, permitiendo que el sol bañase los nuevos brotes en primavera y estos, vigorosos, frenarían la erosión con sus raíces profundas; aumentarían el albedo con el derribo de árboles que, de otra forma, absorberían la luz solar; y agujerearían el manto aislante de nieve, facilitando así la penetración del aire gélido en el suelo. Además, parece poco probable que los furtivos prefiriesen cazar mamuts del ártico que elefantes africanos.

La «desextinción» no es una idea nueva. Ya se ha recuperado el genoma completo del retrovirus endógeno humano HERV-K y del virus de la gripe de 1918. El estudio de estas especies revividas permitirá salvar millones de vidas. Otros genes, como el de la hemoglobina del mamut, se han reconstruido y estudiado con el propósito de descubrir propiedades desconocidas. Pasar de ese puñado de genes a los más de 20.000 que integran el genoma de un ave o un mamífero no es imprescindible, aunque no resultaría muy difícil. El coste de las técnicas necesarias es razonable y sigue bajando.

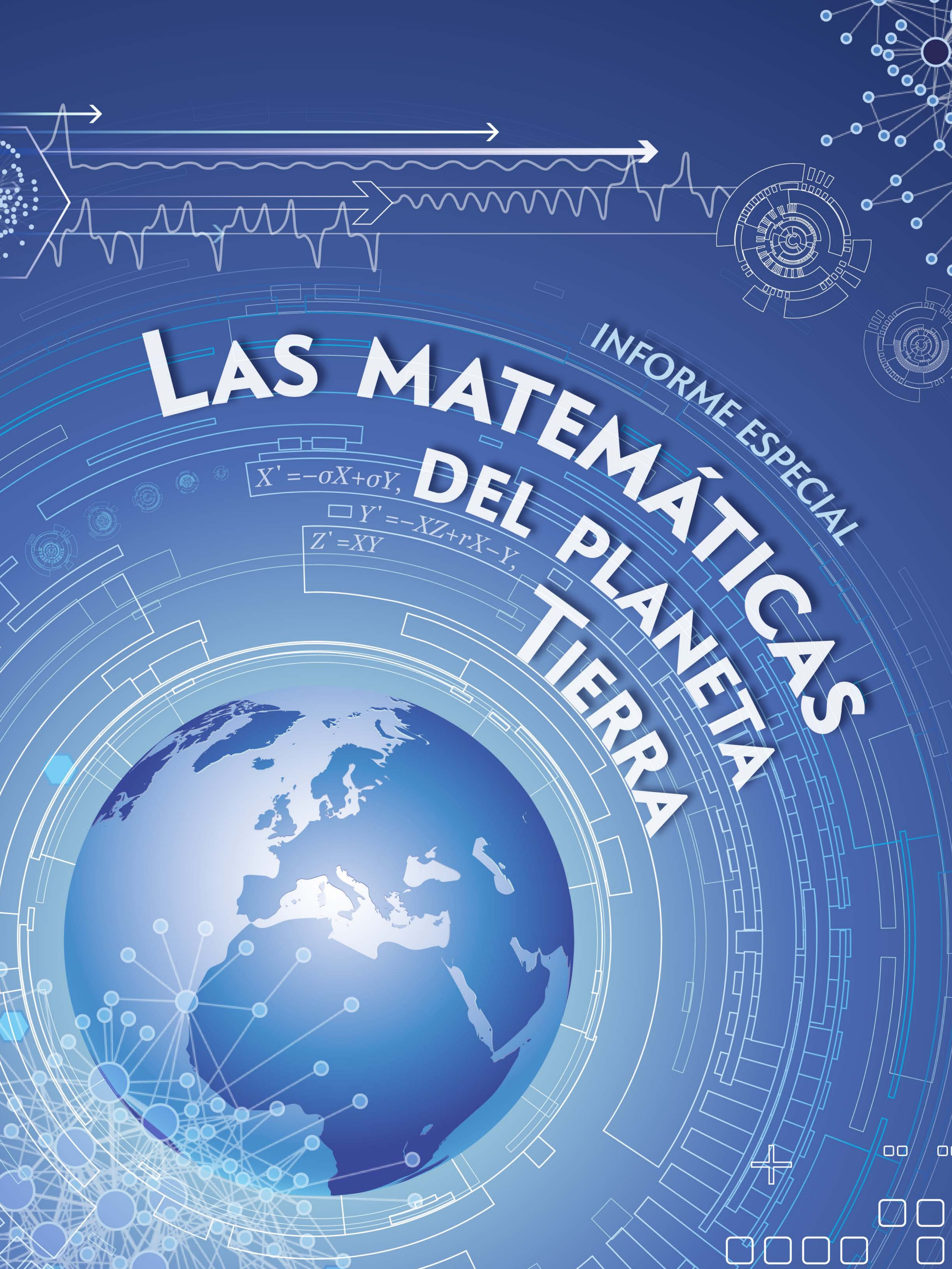


La reproducción y cría de los animales revividos en número suficiente con el objetivo de liberarlos en el medio supone una empresa ambiciosa, pero no más cara que la crianza de ganado o la conservación de otra especie amenazada. Y ese coste podría reducirse mediante mejoras genéticas que reforzaran en las especies revividas la inmunidad, fertilidad, resistencia al estrés ambiental y capacidad para extraer nutrientes de los recursos disponibles.

Aparte de devolver la vida a especies desaparecidas, la recreación contribuiría a recuperar la diversidad genética perdida por especies vivas. Las poblaciones de diablo de Tasmania (*Sarcophilus harrisii*) son tan endogámicas que el intercambio de células tumorales entre los individuos no suele producir rechazo. Un extraño cáncer que se contagia a través de heridas en la cara está acabando con este marsupial [*véase* «El cáncer del diablo», por Menna E. Jones y Hamish McCallum; Investigación y Ciencia, agosto de 2011]; recuperar los genes ancestrales de histocompatibilidad que rigen el rechazo de los tejidos podría salvarlo. Argumentos similares son aplicables a anfibios, guepardos, corales y otros grupos. Los genes antiguos permitirían mejorar la tolerancia a ciertas sustancias, el calor, las infecciones o la sequía.

La recreación no es la panacea para los ecosistemas en peligro. Es primordial evitar la extinción de los elefantes, los rinocerontes y otras especies amenazadas. En cualquier caso, deben establecerse prioridades a la hora de invertir unos recursos de conservación finitos, pero es un error abordar este problema como un juego de suma cero, en el que siempre se gana a costa de otros. De igual manera que la administración de una nueva vacuna puede liberar recursos médicos que de otro modo se destinarían al tratamiento de enfermos, tal vez la recreación dote a los conservacionistas de nuevas herramientas poderosas. Y aunque solo sea una posibilidad, es motivo suficiente para considerarla en serio.

CARLO GIAMBARRESI


INFORME ESPECIAL
LAS MATEMÁTICAS DEL PLANETA TIERRA
X' =−σX+σY,
Y' =−XZ+rX−Y,
Z' =XY

PRESENTACIÓN

Las matemáticas, una ciencia global

La importancia de un lenguaje universal para entender un mundo en constante cambio

Manuel de León

El año 2013 ha sido declarado Año de las Matemáticas del Planeta Tierra, o MPE2013, por sus siglas inglesas. Esa denominación tal vez sorprenda a primera vista —¿qué relación guardan las matemáticas con nuestro planeta?—; sin embargo, son varias las razones para esta iniciativa, la cual llega en un momento crítico en la historia del planeta y de la propia humanidad.

La Tierra es el escenario de multitud de procesos dinámicos de todo tipo, desde los geológicos hasta los atmosféricos, pasando por los biológicos y, por supuesto, los humanos, cuya influencia ha ido creciendo siglo a siglo y, desde hace poco, década a década. Las matemáticas constituyen una herramienta perfecta para entender y modelizar dichos fenómenos.

Si emprendemos un viaje mental desde el interior del planeta hasta la atmósfera, veremos con claridad cómo se desarrolla la obra en este escenario planetario. El núcleo del planeta es sólido (el núcleo interno) y fluido (el externo); su rotación genera un campo magnético que, al proteger la Tierra de radiaciones letales, ha permitido la aparición de vida sobre su superficie. Más arriba hallamos el manto, cuya continua actividad provoca la deriva de los continentes y desastres naturales, como los terremotos o las erupciones volcánicas. Sobre la superficie del globo reposan los océanos, fundamentales en el control del clima, y la atmósfera, la cual no destaca precisamente por su estabilidad.

La superficie terrestre, sólida y líquida, soporta además la vida, cuya dinámica se halla sujeta a procesos evolutivos que se prolongan durante cientos de millones de años y que, al mismo tiempo, inciden de manera notable sobre la propia superficie. Por último, los seres humanos (los últimos —recién— llegados al planeta) hemos incrementado de manera exponencial nuestra influencia sobre la atmósfera y la superficie terrestres, muy especialmente desde la Revolución Industrial.

LOS DESAFÍOS

En todos esos estratos, el planeta encara retos de enorme importancia, que, con un grado de inconsciencia asombroso, aún no somos capaces de asimilar. Se trata de desafíos polifacéticos, que precisan una estrategia multidisciplinar y enfoques globales. La matemática permite obtener esa visión conjunta, lo que —aliada, por supuesto, con el resto de las disciplinas— la convierte en la ciencia más apropiada para afrontarlos.

Las matemáticas constituyen el instrumento que nos permite cuantificar y modelizar, simular los modelos y analizarlos de nuevo a la luz de sus resultados. Gracias a ello podemos entender los fenómenos y predecir lo que vendrá.

Así lo reflejan los cinco artículos que siguen, los cuales aportan un panorama bastante completo de la investigación matemática aplicada al estudio del planeta. Ana M. Mancho analiza la dinámica global de manto y la atmósfera a la luz de la mecánica de fluidos, con énfasis en su naturaleza caótica; Lourdes Tello se centra en los modelos climáticos basados en intercambios energéticos; Jordi Bascompte describe la estructura matemática de las redes ecológicas; Joan Saldaña nos refiere los últimos modelos para estudiar y combatir las epidemias; por último, Anxo Sánchez debate sobre los patrones y relaciones que soportan nuestra propia sociedad.

Todos esos campos de investigación se engloban en los cuatro grandes ejes que la organización del programa MPE2013 señaló

SUMARIO

2013

para abordar a lo largo del año: *un planeta para descubrir,* que incluye el estudio de los océanos, la meteorología, el clima, los procesos del manto, los recursos naturales y el sistema solar; *un planeta que alberga la vida,* que plantea cuestiones relacionadas con la ecología, la biodiversidad y la evolución de las especies; *un planeta organizado por los seres humanos,* que aborda los sistemas políticos, económicos, sociales y financieros, la organización del transporte y las redes de comunicaciones, la gestión de los recursos, y la obtención y distribución de la energía; *un planeta en riesgo,* debido al ya presente cambio climático, la necesidad de un desarrollo sostenible, el peligro de las epidemias, las especies invasivas y los desastres naturales.

VISIÓN Y MISIÓN

Toda empresa de semejante alcance necesita un visionario. En este caso fue Christiane Rousseau, de la Universidad de Montreal, quien lanzó el proyecto. En un primer momento contó con el apoyo de las sociedades e institutos de investigación matemática de Canadá y Estados Unidos, a los que después se sumaron la UNESCO, la Unión Matemática Internacional, el Consejo Internacional de Matemática Industrial y Aplicada y el Consejo Internacional de la Ciencia.

La iniciativa fue diseñada con la idea de fomentar programas de investigación que identificasen y resolviesen los problemas clave de nuestro planeta. Al mismo tiempo, sin embargo, también se ha querido animar a los educadores de todos los niveles para que comuniquen a sus pupilos dichas cuestiones, así como informar a la sociedad del papel fundamental que desempeñan las matemáticas a la hora de encarar los desafíos a los que se enfrenta la humanidad. Tales ideas aparecen —casi de forma literal— en el mensaje que Irena Bokova, directora general de la UNESCO, pronunció el 21 de noviembre de 2012, día en que esta organización anunció su apoyo incondicional a la iniciativa MPE2013.

Al toque a rebato que se hizo desde Montreal respondieron más de un centenar de sociedades científicas, universidades, institutos de investigación y organizaciones de todo el planeta. Como resultado, durante este año se han programado todo tipo de actividades (escuelas, concursos, conferencias, congresos, blogs...) en casi todos los países del mundo. En España, son varios los centros y las sociedades de investigación que se han sumado a la iniciativa.

La inauguración formal de MPE2013 tuvo lugar el pasado 5 de marzo en París, en la sede de la UNESCO. El mensaje de François Hollande rezaba: «Estas jornadas [...] nos recuerdan que las matemáticas —basadas en la abstracción, lo que contribuye a su nobleza— resultan centrales para la comprensión y el funcionamiento del mundo; subrayan la necesidad de desarrollar su enseñanza desde las edades más tempranas, pues constituyen la apuesta esencial de la que dependen nuestra economía y nuestra capacidad de innovación; y nos recuerdan también su carácter universal, así como la consecuente y necesaria dimensión internacional de los estudios y la investigación en matemáticas».

Christiane Rousseau, por su parte, declaró: «Numerosos científicos en todo el mundo comparten ahora mi sueño; MPE2013 se desarrolla ahora por sí mismo, a través de una colaboración sin precedentes que durará, al menos, durante todo 2013». Bien, parece que la iniciativa no terminará este año. Tantos son los temas y el interés que ha generado que MPE2013 continuará más allá de 2013.

Las matemáticas desempeñan un papel fundamental para resolver los grandes retos del futuro más inmediato. Y aunque los matemáticos no sean los únicos científicos capaces de aportar soluciones a los grandes desafíos que afronta nuestro planeta, podemos decir que Gaia, si existiera, tendría una mente matemática.

Manuel de León es profesor de investigación del CSIC y académico de la Real Academia de Ciencias. Dirige el Instituto de Ciencias Matemáticas, centro mixto del CSIC y varias universidades madrileñas. Su investigación se centra en la geometría diferencial, la mecánica geométrica y la física matemática.

Ana M. Mancho es científica titular del Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, del CSIC. Desarrolla su investigación sobre dinámica de fluidos en modelos geofísicos.



GEOFÍSICA

La Tierra, un sistema de fluidos

La dinámica global de nuestro planeta es caótica y turbulenta. ¿Cómo elaborar modelos fiables?

Ana M. Mancho

Los fluidos se hallan presentes en toda la dinámica terrestre. No solo son fluidos el océano o la atmósfera, sino también el interior del planeta. El fluir del manto procede con gran lentitud, por lo que su evolución resulta casi imperceptible para el ser humano. El núcleo externo de la Tierra también es líquido, principalmente hierro fundido, y su rotación generaría el campo magnético terrestre.

Así pues, desde un punto de vista geofísico, todos los procesos globales de nuestro planeta quedan descritos por las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Sin embargo, a pesar de que estas fueron formuladas hace más de dos siglos, la estructura de sus soluciones continúa siendo uno de los problemas más investigados en matemáticas. Ello se debe a sus propiedades no lineales, las cuales entrañan fenómenos caóticos y turbulentos que impiden realizar predicciones detalladas.

En el desarrollo de la dinámica de fluidos destacan los trabajos pioneros de Leonhard Euler, quien en 1755 escribió las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de un fluido no viscoso. Años después, en 1825, Claude-Louis Navier y George G. Stokes introdujeron en ellas un término de viscosidad. Las ecuaciones de Navier-Stokes predicen la evolución del campo de velocidades de un fluido; es decir, el vector de velocidades en cada punto. En el caso que nos ocupa, tales variables describirían los vientos atmosféricos, las corrientes oceánicas o el flujo del manto y el núcleo.

Además del campo de velocidades, en los problemas geofísicos han de tenerse en cuenta otras variables, como la temperatura, la humedad (en el caso atmosférico), la salinidad (en el océano) o los campos electromagnéticos (en el núcleo). Por su parte, el manto terrestre no se comporta como un fluido puramente viscoso, sino que en su dinámica intervienen también propiedades elásticas y plásticas, lo que introduce complicados términos en las ecuaciones.

ESTABILIDAD Y BIFURCACIONES

Las ecuaciones de los fluidos permiten aproximar numerosos comportamientos complejos observados en esos escenarios. El estudio de algunos problemas simplificados ha permitido entender en profundidad varios fenómenos globales. Por ejemplo, en experimentos sencillos se ha comprobado que existen condiciones físicas en las que, ante pequeñas perturbaciones, los fluidos cambian su apariencia y se organizan en nuevas estructuras ordenadas.

Un ejemplo clásico nos lo proporciona la inestabilidad de Rayleigh-Bénard. Esta se produce cuando un fluido se calienta de manera uniforme desde abajo. Cuando el gradiente de temperatura supera cierto umbral crítico, el fluido comienza a moverse, formando rollos de convección en los que el fluido circula de forma alternativa en sentido horario o antihorario. El movimiento de los fluidos producido por diferencias térmicas es un fenómeno global que se observa en la circulación atmosférica, la oceánica y en el interior de la Tierra.

Desde un punto de vista matemático, la existencia de condiciones críticas que desencadenan una inestabilidad se relaciona con la presencia de una *bifurcación*. Como ejemplo sencillo, podemos considerar el movimiento de una canica en el fondo de un valle; lo que en física y matemáticas se conoce como «pozo de potencial». Su mínimo (ubicado, por ejemplo, en $x = 0$) constituye un punto de equilibrio. Este equilibrio es además estable, ya que si propinamos un pequeño impulso a una canica que se encuentra en $x = 0$ (y si existe rozamiento; esto es, si el sistema es disipativo) esta acabará regresando por sí sola al centro del pozo.

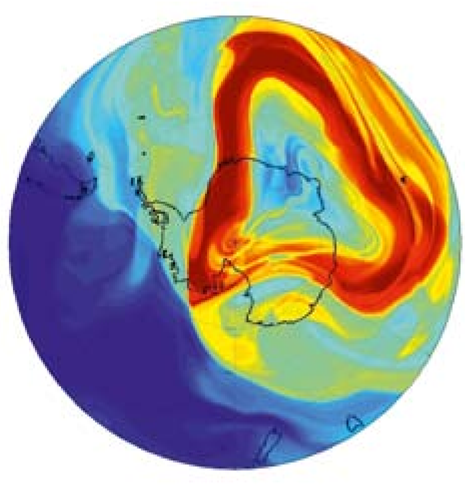
Pero ¿qué ocurre si modificamos la forma del pozo de potencial para levantar una pequeña colina en su centro? En tal caso, la estabilidad del sistema cambiará. El punto $x = 0$, convertido ahora en una cima, aún se corresponderá con un punto de equilibrio; sin embargo, se tratará de un equilibrio inestable, ya que

EN SÍNTESIS

Los procesos geofísicos globales quedan descritos por las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Aunque estas se formularon hace tiempo, la estructura general de sus soluciones aún se desconoce.

Dichas ecuaciones entrañan fenómenos turbulentos y caóticos: su evolución resulta extremadamente sensible a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales.

Para paliar el problema, los modelos atmosféricos agregan grandes cantidades de datos en intervalos de horas. Los modelos oceánicos o sísmicos revisten mayor dificultad.



DINÁMICA TURBULENTA: Las propiedades no lineales de las ecuaciones que describen la dinámica de fluidos dificultan sobremanera el estudio de los procesos geofísicos. A tal fin, los expertos emplean modelos estadísticos y complejas simulaciones informáticas. Esta imagen muestra la geometría de la dinámica caótica de la estratosfera austral. El color rojo corresponde a las regiones en las que las partículas se mueven con mayor rapidez, por encontrarse en la corriente del vórtice polar. En su interior se localiza el agujero de ozono. El color azul indica las regiones en las que las partículas se mueven más despacio. El contraste brusco de colores se asocia a las barreras dinámicas.

CORTESÍA DE ÁLVARO DE LA CÁMARA; BASADO EN «ISENTROPIC TRANSPORT WITHIN THE ANTARCTIC POLAR-NIGHT VORTEX: ROSSBY WAVE BREAKING EVIDENCE AND LAGRANGIAN STRUCTURES», Á. DE LA CÁMARA ET AL. EN *JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES*, VOL. 70, 2982-3001, SEPTIEMBRE DE 2013

si perturbamos ligeramente la posición de una canica colocada allí, esta rodará hacia abajo y se alejará de dicho punto. Además, la deformación habrá creado dos nuevos valles. Estos representan dos nuevos puntos de equilibrio estables, hacia los cuales el sistema evolucionará de manera espontánea.

Tales cambios de estabilidad reciben el nombre de bifurcaciones (el ejemplo anterior se conoce como bifurcación de tridente, o *pitchfork*). La teoría de bifurcaciones proporciona un marco teórico adecuado para describir todo un espectro de soluciones en sistemas dinámicos no lineales a medida que variamos los parámetros físicos que los definen.

Lo que ocurre en una inestabilidad de Rayleigh-Bénard resulta análogo al ejemplo que acabamos de describir. Al variar el gradiente térmico (el equivalente deformar el perfil del valle), la transmisión conductiva del calor se torna inestable y el sistema genera nuevos estados de equilibrio estable; en este caso, los rollos de convección. Si aumentamos aún más el gradiente térmico, aparecerán sucesivas bifurcaciones y el sistema desarrollará nuevos patrones de convección.

A partir de cierto punto, sin embargo, comenzarán a surgir estados turbulentos, caracterizados por un comportamiento complejo y muy desordenado tanto en el espacio como en el tiempo. Algunos estudios recientes sobre la transición hacia dinámicas turbulentas han revelado que las soluciones inestables desempeñan un importante papel, ya que dejan su impronta en el régimen turbulento.

Uno de los pioneros en el estudio de la complejidad en las ecuaciones de dinámica de fluidos fue Edward Lorenz. Hace ahora 50 años, en 1963, al estudiar un modelo atmosférico sencillo, Lorenz descubrió que sus ecuaciones contenían soluciones impredecibles. Esta posibilidad ya había sido anticipada en 1908 por Jules Henri Poincaré en su obra *Ciencia y método*: en ocasiones, las pequeñas incertidumbres en el estado inicial de un sistema pueden amplificarse en el tiempo hasta impedir cualquier predicción futura. De esta forma, si bien las ecuaciones de un fluido son deterministas y permiten calcular su evolución una vez conocido su estado presente, existen condiciones físicas en las que esto último no es posible. Aunque los resultados de Lorenz permanecieron en un segundo plano durante una década, más tarde desencadenarían una intensa investigación en el campo de los sistemas caóticos.

PREDECIR EL CAOS

Tales aspectos de la dinámica de fluidos marcan la modelización matemática en las ciencias de la Tierra. La dinámica atmosférica está sujeta a todo tipo de incertidumbres. Para abordarlas, se emplean modelos muy complejos que incorporan, con un detalle cada vez mayor, la orografía del terreno. A fin de que las predicciones meteorológicas resulten fiables, los modelos agregan cientos de miles de observaciones procedentes de satélites y estaciones meteorológicas.

El procedimiento mediante el cual las mediciones se incorporan a los modelos recibe el nombre de asimilación de datos. Para mantener las incertidumbres bajo control, los pronósticos se realizan sobre un conjunto de predicciones que se promedian e interpretan con técnicas estadísticas. Estos modelos han permitido que, a partir de las observaciones, pueda conocerse a posteriori el estado de toda la atmósfera. Varias instituciones internacionales, como los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental y el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica, en EE.UU., así como el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, proporcionan a posteriori datos de reanálisis que permiten obtener, a intervalos de horas, el valor de las variables atmosféricas en una red de puntos que cubre toda la superficie de la Tierra y que alcanza altitudes de entre 40 y 65 kilómetros.

Aunque en los últimos años ha mejorado nuestra comprensión de las grandes corrientes de circulación marinas y el funcionamiento cualitativo del océano, los modelos oceánicos resultan menos precisos que los atmosféricos. Ello se debe, en parte, a que el número de observaciones que se asimilan en estos modelos es mucho menor que en el caso atmosférico. Existen regiones oceánicas que, por su gran impacto en la actividad humana, revisten un interés especial. Para describirlas se han desarrollado modelos *ad hoc* que asimilan datos y observaciones sobre la zona en cuestión. Tales modelos proporcionan, a intervalos de horas, las variables relevantes a distintas profundidades.

Por último, el interior de la Tierra resulta difícilmente accesible. Su exploración requiere el uso de métodos indirectos. A tal fin, los sismógrafos permiten estudiar la propagación de ondas sísmicas durante los terremotos, gracias a lo cual pueden elaborarse modelos sobre la estructura interior del planeta. La reología de las rocas del manto también resulta bastante desconocida, ya que las condiciones extremas de presión y temperatura a las que se ven sometidas no pueden reproducirse en un laboratorio.

El desconocimiento de tales aspectos en los modelos que describen la dinámica del interior de la Tierra hace que, por ejemplo, hoy por hoy resulte imposible predecir un terremoto. En cambio, a corto plazo los pronósticos meteorológicos sí alcanzan una fiabilidad considerable.

PARA SABER MÁS

Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Subrahmanyan Chandrasekhar. Dover, 1961.

Geophysical fluid dynamics. Joseph Pedlosky. Springer. 2.a edición, 1987.

Dynamic Earth. Geoffrey F. Davies. Cambridge University Press, 2000.

The Earth machine: The science of a dynamic planet. Edmond A. Mathez y James D. Webster. Columbia University Press, 2007.

Lourdes Tello es profesora de matemática aplicada en la Universidad Politécnica de Madrid. Su investigación se centra en el tratamiento matemático de modelos del clima y el medioambiente.



CLIMATOLOGÍA

Modelos de balance energético y clima global

¿Qué mecanismos rigen la evolución del sistema climático a gran escala?

Lourdes Tello

Los modelos matemáticos del clima global constituyen un ejemplo de las numerosas aplicaciones de la matemática a problemas reales. En el estudio del clima, la matemática proporciona herramientas avanzadas para su análisis y predicción mediante un lenguaje universal bien construido. A su vez, la climatología plantea nuevos problemas de los que se alimenta la matemática, contribuyendo así a su desarrollo.

Modelizar el clima del planeta en su conjunto requiere considerar escalas espaciales y temporales relativamente grandes. Así, mientras que una tormenta de verano representa un fenómeno demasiado local para ser incluido en este tipo de modelos, la extensión total de la masa de hielo terrestre y su evolución sí deben tenerse en cuenta. En líneas generales, entendemos que la escala espacial global es del orden de unos 10.000 kilómetros cuadrados o mayor. Dependiendo del tipo de fenómeno que nos propongamos estudiar, las escalas temporales pueden variar desde años y décadas hasta siglos o incluso milenios.

Atendiendo a los procesos físicos que incorporan, se han construido distintos tipos de modelos climatológicos. Los modelos de circulación general, por ejemplo, incorporan el efecto de las corrientes atmosféricas, por lo que requieren emplear las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Por otro lado, los modelos de balance de energía intentan analizar los cambios en la temperatura del planeta a partir de su «presupuesto energético»; es decir, tomando en consideración la cantidad de calor que la Tierra absorbe del Sol y la fracción de energía que vuelve a emitirse hacia el espacio. El desequilibrio entre ambas cantidades se traduce en variaciones de la temperatura del planeta.

Los modelos de balance energético son modelos de diagnóstico, no de pronóstico. Aunque su formulación es determinista (dada la temperatura inicial, permiten calcular la temperatura en un tiempo posterior), el hecho de que solo consideren unos pocos mecanismos climáticos simples impide usarlos para realizar predicciones detalladas. Sin embargo, resultan idóneos para extraer aspectos cualitativos sobre la evolución del sistema climático. Su escala global los convierte en una herramienta muy útil para analizar climas pasados y otros fenómenos de larga duración, como la teoría de ciclos de Milankovitch (los cambios prolongados en el clima terrestre que, en escalas de decenas de milenios, obedecen a las variaciones en la órbita terrestre alrededor del Sol).

ESTADOS DE EQUILIBRIO

En función de su dominio espacial, los modelos de balance de energía pueden clasificarse en tres grupos: modelos cero dimensionales, en los que solo se considera la evolución temporal de la temperatura media del planeta; modelos unidimensionales, en los que la temperatura depende de la latitud y del tiempo; y modelos bidimensionales, donde se considera que la temperatura es una función de la latitud, la longitud y el tiempo.

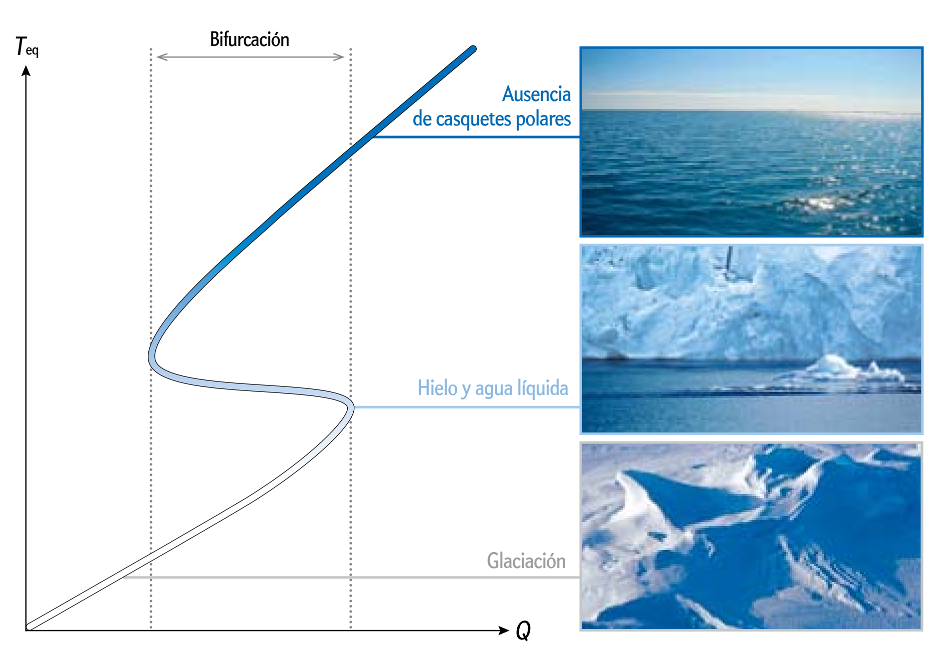
Además de la radiación solar absorbida por la superficie terrestre y la fracción que es reemitida hacia el espacio, los modelos bidimensionales incorporan la redistribución del calor sobre la superficie. El balance energético de todas estas componentes permite obtener una ecuación diferencial

EN SÍNTESIS

Los modelos climatológicos de balance energético analizan los cambios en la temperatura superficial a partir de los mecanismos por los que la Tierra absorbe y reemite la radiación solar.

Su escala global los hace especialmente adecuados para estudiar los patrones cualitativos en la evolución del clima actual, los climas pasados o los ciclos climáticos de muy larga duración.

Las técnicas avanzadas de simulación numérica han permitido ampliar dichos modelos para incorporar los efectos termostáticos del océano profundo y la vegetación.



HIELO Y AGUA: La constante solar (la cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad de superficie que la Tierra recibe del Sol, Q) determina los valores estacionarios de la temperatura superficial del planeta (T_{eq}). Para valores pequeños de Q solo existe un estado de equilibrio, correspondiente a una glaciación. A medida que Q aumenta, crece el número de estados de equilibrio, uno de los cuales describe una situación inestable en la que coexisten hielo y agua líquida. Para valores mayores de la constante solar, el único estado de equilibrio viene dado por un escenario sin casquetes polares.

en derivadas parciales cuya incógnita es la temperatura en la superficie terrestre. Si acompañamos dicha ecuación de una condición inicial conocida, obtendremos un modelo matemático que describe la evolución de la temperatura en cada punto de la superficie.

Los primeros modelos de balance de energía fueron propuestos de forma independiente por Mijaíl I. Budyko y William D. Sellers en 1969. Estos modelos pioneros ya incluían el efecto del coalbedo planetario; es decir, la fracción de la radiación solar incidente que es absorbida por la superficie de la Tierra.

El coalbedo se modeliza como una función que depende de la temperatura en la superficie, lo que introduce en el balance energético mecanismos de retroalimentación: el descenso de las temperaturas favorece la formación de hielo; a su vez, el hielo blanco y brillante refleja casi toda la radiación solar que incide sobre él, lo que reduce la fracción de energía absorbida y provoca una disminución de las temperaturas, conduciendo a la formación de más hielo. Por el contrario, si la temperatura aumenta, disminuye la masa de hielo y, con ella, la cantidad de radiación reflejada, por lo que la temperatura aumenta aún más.

La excentricidad de la órbita terrestre, la oblicuidad del eje o la precesión constituyen algunos de los parámetros que fluctúan en las escalas de tiempo típicas de estos modelos, lo cual también produce patrones climáticos de larga duración.

En colaboración con Jesús Ildefonso Díaz, de la Universidad Complutense de Madrid, Jesús Hernández, de la Universidad Autónoma de Madrid, y David Arcoya, de la Universidad de Granada, hemos estudiado de manera cualitativa la relación entre la constante solar (la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol por unidad de tiempo y unidad de superficie) y los estados de equilibrio del sistema climático. Cuando el valor de la constante solar resulta muy bajo o muy elevado, solo existe un estado de equilibrio, el cual se corresponde o bien con una glaciación, o bien con un escenario sin casquetes polares. Para valores intermedios, sin embargo, aparecen otros estados intermedios (inestables) en los que coexisten el hielo y el agua líquida.

OCÉANO Y VEGETACIÓN

Los estudios sobre el paleoclima indican que, hacia el fin de la última glaciación (hace unos 10.000 años) se produjeron cambios en el océano profundo. Ello sugiere acoplar los modelos de la temperatura superficial con otros que incluyan el efecto del océano. Los modelos acoplados requieren aplicar una metodología distinta a la anterior. El acoplamiento se incorpora como una condición de contorno; es decir, como una restricción que la solución a la ecuación diferencial debe satisfacer en una región determinada. Dicha condición de contorno es dinámica y difusiva, lo que modifica la naturaleza del modelo.

En 2011, en colaboración con Arturo Hidalgo, de la Universidad Politécnica de Madrid, obtuvimos resultados cuantitativos relativos a la temperatura mediante técnicas avanzadas de simulación numérica. Nuestro análisis mostró que, al incluir el efecto del océano profundo, la temperatura superficial se suaviza: su valor mínimo sobre la superficie aumenta, mientras que el máximo disminuye. Tales resultados reflejan el efecto termostático del océano.

También la vegetación regula el intercambio de energía entre el suelo y la atmósfera. Sobre una cubierta vegetal, la atmósfera se torna más húmeda y el contraste térmico entre la noche y el día resulta menor que en las zonas sin vegetación. El efecto que la biosfera ejerce sobre el clima se plasma también en la arquitectura contemporánea, donde la búsqueda de una mayor eficiencia energética ha llevado a considerar la construcción de cubiertas vegetales sobre el tejado de los edificios.

Los modelos de balance energético nos han permitido profundizar en algunos aspectos cualitativos del clima de nuestro planeta; en particular, en el estudio de los mecanismos básicos que rigen su evolución global. De cara al futuro, el reto consistirá en desarrollar modelos en tres dimensiones que incluyan el efecto combinado del hielo, la atmósfera y el océano profundo.

PARA SABER MÁS

El planeta Tierra: El papel de las matemáticas y de los superordenadores. Jaques L. Lions. Espasa Calpe, 1990.

Mathematics, climate and environment. Jesús Ildefonso Díaz y Jaques L. Lions. Masson, 1993.

On a reaction-diffusion system arising in climatology. Georg Hetzer y Lourdes Tello en *Dynamic Systems and Applications*, vol. 11, págs. 381-402, 2002.

A finite volume scheme for simulating the coupling between deep ocean and an atmospheric energy balance model. Arturo Hidalgo y Lourdes Tello en *Modern Mathematical Tools and Techniques in Capturing Complexity*. Springer Series in Complexity, 2011.

Jordi Bascompte trabaja en el grupo de ecología integrativa de la Estación Biológica de Doñana del CSIC, en Sevilla. Ha destacado por sus investigaciones sobre la estructura de las redes ecológicas y su impacto en la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas.



ECOLOGÍA

Las matemáticas de la biodiversidad

Indicadores de alerta temprana y teoría de redes para entender el cambio global

Jordi Bascompte

Nuestro planeta está cambiando a un ritmo nunca visto. El incremento en las emisiones de dióxido de carbono o la fragmentación de los hábitats, entre otros procesos, han llevado la biosfera a una situación crítica. No obstante, aún sabemos muy poco sobre cómo responderán los ecosistemas. Profundizar en esta cuestión requiere aunar la investigación en diversos ámbitos; entre ellos, la matemática.

Las personas tendemos a pensar de forma lineal, seguramente como reflejo de una educación basada en la regla de tres. Así, si al destruir el 10 por ciento de un bosque tropical desaparecen el 5 por ciento de las especies, nos inclinaremos a concluir que arrasar el 30 por ciento del primero conllevará la pérdida del 15 por ciento de las segundas. Hoy sabemos que esta forma de razonar es errónea. A menudo —y al igual que ocurre con numerosos sistemas complejos de otras clases— la respuesta de los ecosistemas no es lineal. Ello significa que no existe una relación proporcional entre la magnitud de una perturbación y sus consecuencias.

Ese error se aprecia con claridad en los modelos de poblaciones que habitan en paisajes fragmentados. En los años ochenta, el biólogo teórico Russell Lande desarrolló un modelo matemático para predecir qué ocurriría con una especie de cárabo que se encontraba amenazada por la tala masiva de bosques maduros en el noroeste de Estados Unidos. Lande concluyó que, una vez que cierta cantidad crítica de bosque hubiese sido destruida, la población se extinguiría con independencia de que aún quedase una proporción de paisaje prístino.

El concepto de umbral de extinción constituye un ejemplo del gran poder pedagógico de las matemáticas en el campo de la biología de la conservación. Tanto es así que, en el caso mencionado, Lande fue llamado a testificar en el juicio que enfrentaba a la industria maderera contra los movimientos conservacionistas.

TRANSICIONES ABRUPTAS

El ejemplo anterior ilustra que en los ecosistemas existen puntos críticos, o fenómenos de umbral. Estos resultan análogos a los que en física separan el estado líquido del gaseoso a medida que se incrementa la temperatura de un fluido. El mismo concepto describe cambios abruptos en ecología.

Otro caso paradigmático lo hallamos en el comportamiento de un lago a medida que se va vertiendo en él más y más nitrógeno. Un lago prístino se caracteriza por poseer aguas transparentes, una elevada concentración de oxígeno y una gran diversidad de especies. Si comenzamos a incorporar nitrógeno, en un principio el lago permanecerá en su estado original. Sin embargo, llegará un momento en que la cantidad de nitrógeno alcanzará un umbral crítico. A partir de entonces, un ligero aumento en su concentración provocará que el lago pase a un estado muy diferente del inicial: las aguas se volverán túrbidas y surgirán unas pocas especies de algas que crecerán con gran rapidez y consumirán todo el oxígeno.

De nuevo, cerca del punto crítico no podemos extrapolar lo que había venido sucediendo antes de que nos acercásemos a él. Una segunda propiedad de ese cambio de fase la hallamos en su irreversibilidad: para recuperar el lago prístino, no bastará con sustraer nitrógeno hasta alcanzar la cantidad que inició el cambio abrupto, sino que deberemos limpiarlo hasta concentraciones mucho menores. En otras palabras: el camino de ida no es el mismo que el de vuelta. Las investigaciones del ecólogo Marten Scheffer, de la Universidad de Wageningen, han puesto de manifiesto que esas transiciones abruptas se han observado en numerosos ecosistemas de otras clases.

El siguiente paso en esta línea de investigación consiste en preguntarse si podemos predecir cuándo nos hallamos próximos a una transición crítica. Nótese que esta cuestión tiene un interés aplicado inmediato: por lo dicho arriba, resulta

EN SÍNTESIS

La manera en que un ecosistema reacciona ante los cambios del entorno no siempre es lineal. En ocasiones, pequeñas alteraciones en el hábitat pueden provocar el colapso abrupto de un ecosistema.

Esos cambios drásticos pueden ser irreversibles. Para prevenirlos, los investigadores estudian qué patrones de comportamiento desarrolla un ecosistema que se encuentra próximo a un punto crítico.

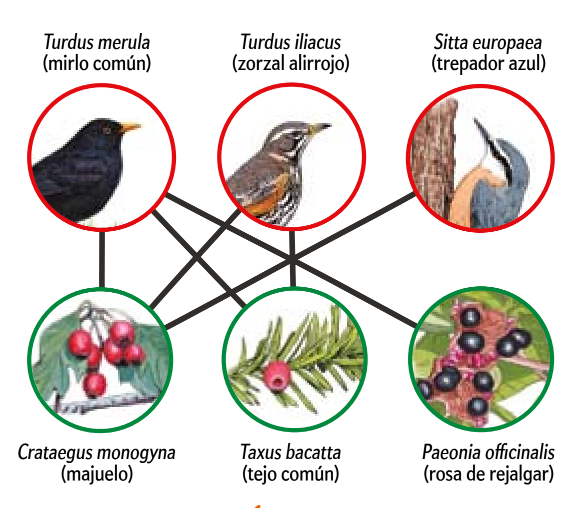
La estabilidad de un ecosistema depende también de la red que forman las relaciones entre especies. El estudio de las propiedades matemáticas de dichas redes permite abordar el cambio global desde un punto de vista sistémico.

JESÚS MORÓN (*fotografía*)

mucho más fácil revertir la situación antes de llegar al umbral que después de haberlo traspasado.

Hace cuatro años, como parte de una colaboración interdisciplinar liderada por Scheffer, publicamos un artículo de revisión en la revista *Nature* en el que repasábamos diversos indicadores estadísticos que, al menos en ciertos casos, sirven para advertir de la cercanía de un cambio abrupto. En general, a medida que un sistema se aproxima a un punto sin retorno, podemos esperar dos tipos de comportamiento: por un lado, las fluctuaciones comenzarán a crecer de manera considerable; por otro, si perturbamos el sistema, el tiempo que este tardará en regresar a su estado de reposo también aumentará de forma notable.

Esos indicadores parecen funcionar en una gran variedad de situaciones. La razón se debe a que, cerca de un punto crítico, los detalles concretos del sistema no resultan demasiado relevantes, ya que las leyes matemáticas que dictan su dinámica global son siempre muy similares. Es el conocimiento de dichas propiedades matemáticas lo que, más allá de los detalles biológicos del ecosistema, rige su comportamiento a gran escala.



ESTABILIDAD SISTÉMICA: Las interacciones mutualistas entre especies forman redes complejas. Los modelos matemáticos han demostrado que su estructura es aquella que favorece la coexistencia de todas las especies, por lo que pueden considerarse la «arquitectura» de la biodiversidad. Este ejemplo ilustra algunas de las relaciones mutualistas entre plantas con frutos y sus dispersores de semillas observadas en la Sierra de Cazorla.

LA ARQUITECTURA DE LA BIODIVERSIDAD

Hasta ahora, ese tipo de transiciones abruptas y sus indicadores de alerta temprana se han estudiado en sistemas relativamente sencillos. Por tanto, persiste la duda de si dicho comportamiento seguirá observándose en casos más complejos. Hasta hace poco, la complejidad se había asociado a la dinámica de los ecosistemas. Pero existe otro factor a tener en cuenta: el número de especies que viven en un hábitat y la estructura de la red que surge al considerar sus relaciones mutuas.

Un ejemplo lo hallamos en las redes que forman las plantas con flor y los animales que las polinizan o dispersan sus semillas. El estudio de estas redes mutualistas ha demostrado que la coevolución entre unas y otros no tiene por qué conducir ni a una relación muy especializada entre dos especies, ni a un proceso difuso que escape a cualquier análisis.

A pesar de las diferencias manifiestas en el tipo de mutualismo y otros factores ecológicos, se ha observado que dichas redes exhiben una arquitectura que se repite una y otra vez. Sus características principales son tres: se trata de redes muy heterogéneas, «encajadas» y basadas en dependencias asimétricas.

Su heterogeneidad se manifiesta en el hecho de que, mientras que la mayoría de las especies interaccionan con solo unas pocas (son «especialistas»), algunas son supergeneralistas y se relacionan con un número muy grande de especies. Por otro lado, hablamos de redes encajadas porque, cuanto más especialista es una especie, más generalistas son aquellas con las que interacciona, lo cual da lugar a una estructura anidada (por ejemplo, la planta que solo interacciona con un animal lo hace con aquel que interacciona con todas las especies vegetales; la que interacciona con dos lo hace con los dos animales más generalistas, etcétera). Por último, si una especie de planta depende mucho de un polinizador, este apenas depende de la planta.

Los patrones estructurales mencionados resultan clave para la persistencia de una red mutualista. En este contexto, la estabilidad estructural determina el volumen del espacio de parámetros (valores de las tasas de crecimiento de las especies, por ejemplo) compatibles con la coexistencia de todas las especies. Dado que en la naturaleza siempre sobrevienen cambios, cuanto mayor sea ese abanico de parámetros más fácil será mantener la coexistencia. Los análisis matemáticos basados en este concepto han revelado que la estructura observada en la naturaleza es aquella que maximiza las condiciones para la persistencia de un número mayor de especies. Las redes mutualistas, por tanto, constituyen la arquitectura de la biodiversidad.

Este enfoque basado en la estabilidad estructural es nuevo en ecología. Hasta la fecha, la mayor parte de los desarrollos teóricos se han basado en la noción de estabilidad local. Esta determina si, tras sufrir una perturbación infinitesimal, un ecosistema regresa o no a su punto de equilibrio.

El reto actual consiste en aunar ambas líneas de investigación: el estudio de indicadores de alerta temprana (normalmente considerados en sistemas ecológicos sencillos) y el análisis de la complejidad que emana de las relaciones de dependencia mutua entre especies. De esta manera, la matemática de las redes complejas nos permite abordar el cambio global desde un punto de vista sistémico. En lugar de estudiar sus efectos sobre la abundancia o la distribución geográfica de una especie, podemos evaluar su impacto sobre comunidades enteras.

Charles Darwin, el padre de la teoría de la evolución por selección natural, escribió en su autobiografía: «Lamento profundamente no haber perseverado lo suficiente para entender al menos algunos de los grandes principios fundamentales de las matemáticas; pues la gente así formada parece poseer un sentido adicional.» Durante los próximos años, deberemos esforzarnos por entender mejor los riesgos sistémicos que el cambio global implica para los ecosistemas. Cabe esperar que dicho objetivo se logre gracias un enfoque interdisciplinar en el que, sin duda, las matemáticas desempeñarán una función clave.

PARA SABER MÁS

Redes mutualistas de especies. Jordi Bascompte y Pedro Jordano en *Investigación y Ciencia*, n.º 384, septiembre de 2008.

The architecture of mutualistic networks minimizes competition and increases biodiversity. Ugo Bastolla et al. en *Nature*, vol. 458, págs. 1018-1020, 23 de abril de 2009.

Disentangling the web of life. Jordi Bascompte en *Science*, vol. 325, págs. 416-419, 24 de julio de 2009.

Early-warning signals for critical transitions. Marten Scheffer et al. en *Nature*, vol. 461, págs. 53-59, 3 de septiembre de 2009.

Approaching a state shift in Earth's biosphere. Anthony D. Barnosky et al. en *Nature*, vol. 486, págs. 52-58, 7 de junio de 2012.

Ecosistemas al borde del colapso. Carl Zimmer en *Investigación y Ciencia*, n.º 435, diciembre de 2012.

PEDRO JORDANO (*datos de la red*); LUJO GILARANZ (*diseño*) Y JOAQUÍN LÓPEZ ROJAS (*ilustraciones*)

Joan Saldaña es profesor titular de matemática aplicada en la Universidad de Gerona e investigador responsable del grupo «Ecuaciones diferenciales, modelización y aplicaciones», de la misma universidad. Investiga en biología matemática y redes complejas.



EPIDEMIOLOGÍA

Modelos de propagación de enfermedades

La estructura de las sociedades modernas ha modificado los patrones de contagio de las enfermedades infecciosas

Joan Saldaña

La propagación de epidemias nos brinda una de las muestras más claras de la reciente globalización de la actividad humana. La gran movilidad de las personas favorece la rápida difusión de enfermedades entre distintas regiones del planeta. Un ejemplo aún vigente lo hallamos en el brote del síndrome respiratorio de Oriente Medio, causado por un nuevo tipo de coronavirus detectado en septiembre de 2012. Unos años antes, en noviembre de 2002, otra variante de esta clase de patógenos había provocado la aparición del síndrome respiratorio agudo severo (SRAS). Aunque el brote se originó en China, la enfermedad acabó ocasionando unas 800 muertes en Asia y otros continentes. A principios de este año se detectaron en China los primeros casos de infección en humanos de la gripe A H7N9, de origen aviar.

La repercusión mediática que han recibido estas epidemias no solo se debe a la novedad de observar dichos brotes en humanos, sino también a la alerta causada por su avance geográfico. ¿Hemos aprendido algo de estos episodios?

Por lo que respecta a la modelización matemática de la dinámica de las enfermedades infecciosas, podemos decir que hubo un antes y un después del SRAS. Su rápida propagación a Canadá y Estados Unidos propició una colaboración internacional sin precedentes coordinada por la Organización Mundial de la Salud. Como resultado, se obtuvo información muy detallada sobre las rutas de transmisión de las infecciones ocurridas en Hong Kong, Singapur y Ontario, entre otros lugares.

Aquellos datos arrojaron dudas sobre una de las premisas básicas empleadas hasta entonces en la modelización de epidemias: a saber, que los individuos de una población se mezclan de manera homogénea. Ello puso de relieve que los resultados basados en transmisiones locales no siempre pueden extrapolarse a un ámbito global.

PATRONES DE TRANSMISIÓN

Los modelos clásicos compartimentan la población en grupos homogéneos. El modelo SEIR, por ejemplo, la divide en individuos que se hallan en riesgo de enfermar (S, del inglés *susceptible*), portadores del patógeno pero que aún no pueden transmitirlo (E, *exposed*), infecciosos (I, *infectious*) y recuperados (R, *recovered*). Además, se supone que todos los individuos cuentan con la misma probabilidad de entrar en contacto unos con otros.

La ventaja de dichas hipótesis reside en que permiten obtener modelos relativamente simples. Sin embargo, las previsiones iniciales sobre la propagación del SRAS basadas en esos supuestos resultaron excesivamente alarmistas. La razón probablemente se debiese a que los patrones sociales de transmisión de una enfermedad infecciosa resultan más complejos que los que se derivan de una mezcla homogénea de individuos.

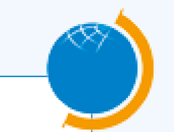
En las sociedades modernas existen diversos grados de mezcla entre indivi-

EN SÍNTESIS

Los modelos clásicos de propagación de epidemias suponen contactos homogéneos entre la población. La globalización, sin embargo, está obligando a considerar otras pautas de contagio.

Durante los últimos años, diversos sistemas de alerta han permitido obtener información muy detallada sobre las rutas de transmisión de varios brotes infecciosos globales.

A fin de incorporar la estructura de los contactos infecciosos en una población, los expertos están desarrollando nuevos modelos basados en la teoría de redes.



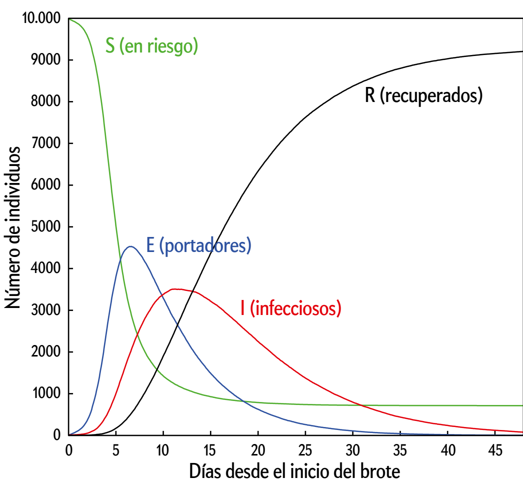
duos. Algunos espacios, como escuelas, hospitales, centros comerciales o grandes edificios de oficinas, reúnen una serie de condiciones que facilitan sobremanera la propagación de agentes infecciosos; sobre todo, si se trata de enfermedades que se transmiten por vía respiratoria. Las zonas rurales, en cambio, con una escasa densidad de población, ofrecen un freno para la propagación a escala regional. Parece claro, pues, que nuestros modelos deberían contemplar esas estructuras de población.

Por otro lado, no todos los individuos presentan el mismo número de contactos. En el caso de las enfermedades de transmisión sexual, como el sida, es bien conocida la existencia de una gran disparidad en el número de contactos por individuo, hasta el punto de que unos pocos de ellos pueden actuar como «superpropagadores». En el caso del SRAS, cabe mencionar el brote que tuvo lugar en Hong Kong en 2003, donde se produjeron dos grandes grupos epidémicos. En uno de ellos, hubo un mínimo de 125 personas infectadas por el mismo individuo.

Ambos aspectos, los distintos niveles de mezcla entre grupos y la heterogeneidad en el número de contactos por individuo, influyen en la estimación inicial del número medio de contagios que origina un infectado. Esta cantidad, el número reproductivo básico, o R_0, resulta fundamental en epidemiología, ya que determina el progreso ($R_0 > 1$) o la extinción ($R_0 < 1$) de un brote epidémico. R_0 constituye una medida de cuán contagiosa es una enfermedad, por lo que depende tanto de factores biológicos (como la duración del período infeccioso, la probabilidad de transmisión del patógeno o su tasa de mutación) como sociales y demográficos (la relación entre susceptibilidad y edad, la tasa de contactos de los primeros individuos infectados, etcétera).

REDES SOCIALES Y CONTAGIO

Cuando aparece un brote epidémico causado por un nuevo agente infeccioso, las primeras medidas van encaminadas a determinar su capacidad de transmisión y las primeras incidencias. Pero ¿podemos aspirar a conocer la red social formada por los contactos entre los individuos de una población? Y, aun conociéndola, ¿qué información deberíamos introducir en ella para calcular R_0?



REDES DE CONTAGIO: Simulación de la evolución de una epidemia de tipo SEIR sobre una red de contactos formada por 10.000 individuos. El número de contactos por nodo sigue una distribución exponencial negativa de media 8. La duración media del período latente es de 5 días, y la del período infeccioso, de 7 días. La tasa de transmisión por contacto entre los individuos en riesgo y los sujetos infecciosos es de 0,05.

A escala local (escuelas, hospitales, etcétera) resulta posible obtener una descripción bastante exacta de los contactos entre individuos. A escalas mayores, los modelos probabilísticos de redes ofrecen la posibilidad de estudiar la propagación de epidemias en conjuntos de redes de contacto que comparten características similares. A partir de ellos, las herramientas matemáticas de la teoría de redes permiten obtener predicciones sobre la probabilidad de que un brote llegue a constituir una epidemia o sobre la efectividad de las diversas medidas de contención. Este enfoque, a pesar de no ser dinámico, constituye una alternativa a los modelos compartimentales (SEIR). Una tercera vía, complementaria a las anteriores, la proporcionan los modelos de simulación basados en individuos, también conocidos como IBM por sus siglas en inglés (*individual-based models*).

La definición de R_0 resulta intuitiva y fácil de formalizar cuando todos los individuos son iguales frente a la enfermedad y se mezclan entre sí de manera homogénea. Sin embargo, si alguna de esas hipótesis no se cumple, deben introducirse nuevos conceptos matemáticos que permitan calcular R_0 de manera rigurosa y más acorde con la realidad. Uno de ellos es la matriz de la siguiente generación. Esta contiene la información del número de infecciones por unidad de tiempo que producirá un individuo infeccioso cuando visite los distintos grupos en los que se divide la población, así como del tiempo medio que pasará en cada uno de ellos.

Una vez conocida esa matriz, la cual puede obtenerse a partir de las ecuaciones para la dinámica de la epidemia, la definición de R_0 debe generalizarse para dar cuenta del carácter «multidimensional» del patrón infeccioso. En términos técnicos, R_0 pasa a definirse como el radio espectral de dicha matriz (en esencia, el mayor de sus valores propios). Si bien se trata de una definición más abstracta, es también más general y puede aplicarse a situaciones en las que la población, además de mostrar una estructura social compleja, se halla repartida geográficamente en subpoblaciones conectadas entre sí por flujos migratorios.

Capítulo aparte merecen enfermedades infecciosas como la malaria, el dengue o la enfermedad de Chagas, entre otras muchas. En ellas, el agente infeccioso se propaga de un huésped a otro a través de un vector (mosquitos en el caso del dengue y la malaria, y artrópodos en el de la enfermedad de Chagas). Debido a la complejidad del proceso de transmisión, aún quedan sin responder numerosas preguntas sobre su propagación y el impacto de las medidas de control adoptadas. Esta situación hace de los modelos matemáticos una herramienta imprescindible para responder con rigor a varias cuestiones fundamentales. ¿Cuál es el riesgo de que una enfermedad endémica reaparezca en una región determinada? ¿Cómo se relaciona dicho riesgo con las posibles variaciones climáticas de la región? ¿Cuál es la probabilidad de que emerja una nueva enfermedad en una zona donde antes no la había?

PARA SABER MÁS

Network theory and SARS: Predicting outbreak diversity. Lauren A. Meyers et al. en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 232, págs. 71-81, 7 de enero de 2005.

Las grandes plagas modernas. Salvador Macip. Editorial Destino, 2010.

Modeling infectious diseases in humans and animals. Matt J. Keeling y Pejman Rohani. Princeton University Press, 2008.

Evolución vírica en la era genómica. Raúl Rabadán en *Investigación y Ciencia*, n.º 427, abril de 2012.

Mathematical tools for understanding infectious disease dynamics. Odo Diekmann, Hans Heesterbeek y Tom Britton. Princeton University Press, 2013.

Sistema de Alerta y Respuesta ante Epidemias y Pandemias. Organización Mundial de la Salud. **www.who.int/csr/es/index.html**

Anxo Sánchez es catedrático de matemática aplicada en la Universidad Carlos III de Madrid. Miembro fundador del Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos, su investigación se centra en las aplicaciones de la física a otras disciplinas; en particular, a la biología, la ecología y las ciencias sociales.



EVOLUCIÓN

Redes sociales y cooperación

Modelos matemáticos, simulaciones y experimentos para entender uno de los rasgos más enigmáticos de nuestra especie

Anxo Sánchez

¿Cómo hemos llegado a construir una sociedad tan compleja como la del siglo xxi? Desde un punto de vista social, uno de los rasgos más característicos del ser humano es su gran capacidad para cooperar, mucho mayor que la observada en cualquier otra especie. Sin embargo, numerosos comportamientos cooperativos típicos de las sociedades humanas no pueden explicarse por el simple hecho de compartir genes. Cada vez que ayudamos a personas que se cruzan fugazmente en nuestra vida, que no guardan ninguna relación con nosotros y a las que no volveremos a ver, estamos obrando sin obtener ningún beneficio a cambio. ¿De dónde surge este comportamiento?

Una de las propuestas que más interés ha suscitado sostiene que la cooperación surgiría de modo natural en grupos integrados por individuos que interaccionan entre sí. Si los miembros de una comunidad tienden a ayudarse, ello les conferiría ciertas ventajas frente a otros grupos menos cooperativos. Desde un punto de vista matemático, esta propuesta se ha analizado mediante la teoría de juegos en redes. En cuanto a la dinámica de cooperación, la mayoría de los trabajos se han centrado en un problema paradigmático: el dilema del prisionero.

Aunque su nombre se debe a su encarnación más popular (en la que dos delincuentes han de negociar con la policía), el dilema del prisionero no es más que una abstracción matemática del problema básico de la cooperación. Cada jugador debe decidir si otorga o no un beneficio b a su compañero, sacrificando al mismo tiempo un coste $c < b$. Si ambos cooperan, cada jugador obtiene un beneficio neto $b - c$. Si ambos deciden no cooperar, ninguno logra nada. Y si uno coopera y el otro no, este último consigue un beneficio neto b y el cooperador paga un coste c; es decir, pierde en vez de ganar.

Este dilema fue propuesto en los años cincuenta por Anatol Rapoport y Albert M. Chammah en el contexto de los estudios sobre la guerra nuclear. Resume de manera admirable el problema que plantea la cooperación: al analizar todas las opciones, lo más conveniente para cada jugador es siempre no cooperar (ya que, haga lo que haga su compañero, esa estrategia proporciona siempre un beneficio mayor que cooperar). Sin embargo, ello implica que los dos individuos llegarán a la misma conclusión. Ninguno de ellos cooperará y ambos obtendrán una ganancia nula, en lugar del beneficio $b - c$ que habrían logrado en caso de ayudarse.

COMPORTAMIENTO RECÍPROCO

En un célebre trabajo de 1992 que hoy ya cuenta con casi dos mil citas, Martin A. Nowak y Robert M. May simularon por ordenador un modelo de cooperación en el que los «jugadores» ocupaban los nodos de una red cuadrada. En turnos sucesivos, cada uno se enfrentaba a un dilema del prisionero contra sus ocho vecinos. (En este contexto, decimos que dos jugadores son «vecinos» si se hallan conectados por uno de los enlaces de la red.)

Nowak y May observaron que, si cada nodo actuaba imitando la acción del vecino que había obtenido un mayor beneficio en la ronda anterior, aparecían comunidades de cooperadores formadas por nodos muy agrupados. Como vemos, este proceso apoya la idea de que la cooperación surge entre grupos de individuos que interaccionan entre sí. Dicho mecanismo de promoción de la cooperación recibió el nombre de reciprocidad de red.

La idea suscitó un enorme interés, sobre todo a partir del auge de la investigación en teoría de redes desde un punto de vista social. Desde entonces se han publicado cientos de artículos que, mediante métodos analíticos o simulaciones numéricas, han investigado distintas combinaciones de juegos, redes y dinámicas evolutivas.

El estudio original de Nowak y May consideraba una red regular en la que todos los nodos tenían el mismo número de enlaces. En 2005, sin embargo, el investigador de la Universidad de Lisboa Jorge Pacheco y otros dos colaboradores se pre-

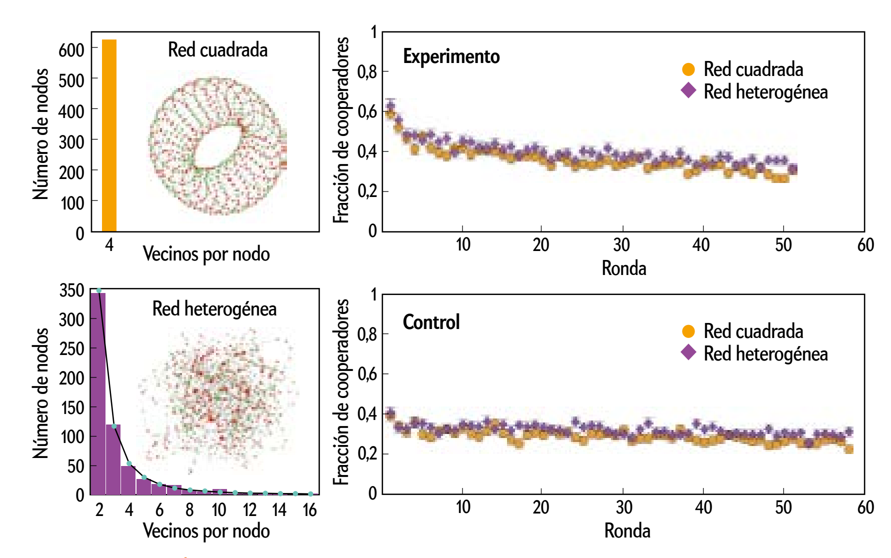
EN SÍNTESIS

La cooperación entre desconocidos es una de las características definitorias de nuestra especie. No obstante, su origen continúa planteando multitud de interrogantes.

Los modelos matemáticos de teoría de juegos en redes parecen indicar que la cooperación emergería en grupos de individuos entre quienes existen interacciones mutuas.

Sin embargo, ese comportamiento no se observa en humanos. Las redes dinámicas y ciertos modelos inspirados en las teorías de campo medio podrían ayudar a esclarecer la cuestión.

guntaron qué ocurriría si situaban a los jugadores en otro tipo de redes, las llamadas «redes sin escala». Estas aparecen de forma natural en todo tipo de contextos y se caracterizan por el hecho de que, aunque la gran mayoría de los nodos solo poseen unos pocos enlaces, algunos cuentan con un número enorme de vínculos [*véase* «Redes sin escala», por A.-L. Barabási y E. Bonabeu; Investigación y Ciencia, julio de 2003]. Las simulaciones del grupo de Pacheco y otras posteriores revelaron que las redes sin escala permitían mantener un alto nivel de cooperación incluso cuando la red cuadrada no lo lograba, lo cual ocurre para valores elevados de *b*.



COOPERACIÓN REAL: Las redes no promueven la cooperación en humanos. Estas gráficas muestran los resultados de un experimento con 1229 sujetos repartidos en dos redes, una cuadrada en la que todos los nodos poseen cuatro vecinos (*arriba a la izquierda*) y otra heterogénea (*abajo a la izquierda*). Los histogramas indican la ley de distribución de vecinos; las gráficas, la evolución de la fracción de individuos dispuestos a cooperar cuando todos ocupan puestos fijos en la red (*arriba a la derecha*) y cuando se les reordena de modo aleatorio (equivalente a suprimir la red, *abajo a la derecha*).

DILEMAS HUMANOS

Pero ¿se ajustan esos modelos a los patrones de cooperación observados en humanos? A pesar del gran interés de la comunidad científica, hasta hace muy poco los estudios se habían limitado al aspecto teórico. Los primeros experimentos con personas no llegaron hasta 2010. Ese año, nuestro grupo de investigación se propuso verificar las predicciones de dichos modelos con redes humanas.

Nuestro primer experimento se efectuó con una red cuadrada de 169 individuos. Los resultados mostraron que, tras repetir el juego unas decenas de veces, la fracción de cooperadores se reducía al 20 por ciento; es decir, la cooperación por reciprocidad en red no sobrevivía. Al analizar el comportamiento de los participantes, se observó que estos eran más propensos a cooperar cuanto mayor fuese el número de vecinos que habían cooperado en la ronda anterior.

Ese mecanismo, conocido como cooperación condicional, ya se había observado en otros estudios. Sin embargo, nuestra investigación reveló algo más: que la decisión de un individuo en una ronda influía sobre sus acciones futuras. En general, era más probable que un individuo cooperase en una ronda si ya lo había hecho en el turno anterior.

Ese dato experimental nos permitió proponer un nuevo modelo teórico que reprodujese los resultados experimentales. En 2012, demostramos que dicho modelo podía estudiarse analíticamente empleando teoría de campo medio, un tipo de aproximación muy empleada en mecánica estadística. En esencia, consiste en suponer que cada nodo interacciona con un solo vecino, el cual se comporta como un promedio de toda la población. En un modelo con este tipo de jugadores, el nivel de cooperación se acercaba al observado.

A pesar de todo, dicho modelo no dejaba de ser una aproximación, por lo que debíamos explorar sus posibles problemas. Al ejecutar las correspondientes simulaciones por ordenador y situar a los jugadores en redes de distintos tipos, observamos que el resultado concordaba con el modelo de campo medio. La conclusión, por tanto, estaba clara: las redes no ejercían ninguna influencia en la emergencia de la cooperación en humanos.

Por último, el año pasado llevamos a cabo un experimento a gran escala. En él, situamos a 625 voluntarios en una red cuadrada virtual, mientras que a otros 604 se les hizo participar en una red heterogénea, en la que el número de vecinos podía variar entre 2 y 16.

Una vez más, la estructura de la red se mostró irrelevante: en ambos casos, la evolución en el tiempo de la fracción de individuos que cooperaban resultó ser casi la misma. También efectuamos sendos experimentos de control en los que los participantes eran redistribuidos de modo aleatorio después de cada ronda. De manera efectiva, dicha situación equivalía a eliminar la red, ya que los vecinos cambiaban en cada turno y todos los jugadores acababan interaccionando con todos. También en este caso quedó refutada la reciprocidad de red como mecanismo promotor de la cooperación. Nuestros resultados fueron publicados en agosto de 2012 en la revista *PNAS*.

Si las redes no impulsan la cooperación, ¿qué lo hace? Algunos investigadores han comenzado a explorar el fenómeno en redes autoorganizadas; es decir, aquellas en que los individuos pueden decidir con quién crear o romper enlaces. Varios trabajos parecen indicar que en tales casos sí aumenta el nivel de cooperación, si bien aún se desconoce cuál es el mecanismo responsable.

El estudio de redes dinámicas resultará muy útil para analizar contextos muy diversos, como el diseño de organizaciones y estructuras jerárquicas. ¿Debe concederse a las personas un cierto grado de autonomía para elegir a sus compañeros de trabajo? ¿Son más productivas las compañías con un organigrama más flexible? Sin duda, las respuestas a estas y otras preguntas serán de gran ayuda a la hora de entender un mundo cada vez más interconectado.

PARA SABER MÁS

La evolución de la cooperación: El dilema del prisionero y la teoría de juegos. Robert Axelrod. Alianza Editorial, 1996.

Social experiments in the mesoscale: Humans playing a spatial Prisoner's Dilemma. Jelena Grujić et al. en *PloS ONE*, vol. 5, n.º 11, e13759, noviembre de 2010.

Heterogeneous networks do not promote cooperation when humans play a Prisoner's Dilemma. Carlos Gracia-Lázaro et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, págs. 12.922-12.926, 7 de agosto de 2012.

¿Por qué cooperamos? M. Nowak en *Investigación y Ciencia*, n.º 433, octubre de 2012.

Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos: **www.gisc.es**

Página web del autor: **www.anxosanchez.eu**

HISTORIA DE LA FÍSICA

Herschel y el rompecabezas de la radiación infrarroja

La elucubración mental de un astrónomo consiguió relacionar luz y calor por primera vez

Jack R. White

La mayoría de las enciclopedias y libros de física otorgan al célebre astrónomo Sir William Herschel el mérito de haber descubierto la radiación infrarroja en el año 1800. Se trata de una bonita historia. Pero no es del todo correcta, pues trivializa el verdadero significado de los hallazgos de Herschel.

Todos descubrimos la radiación infrarroja durante nuestra infancia, al sentir el calor de un objeto caliente situado a cierta distancia. Y sabemos que esos rayos son invisibles, ya que el calor puede también percibirse en medio de la más absoluta oscuridad. Pero Herschel descubrió algo más sutil que una radiación invisible. Halló los primeros indicios sólidos de que, en realidad, la luz visible y el infrarrojo formaban parte del mismo fenómeno, al que hoy denominamos radiación electromagnética. A través de una serie de experimentos sencillos, Herschel se topó con la primera pieza de un rompecabezas que aún tardaría más de un siglo en resolverse.

La mejor información sobre los experimentos de Herschel la hallamos en sus escritos originales. Buena parte de los comentarios parece que hayan sido tomados directamente de sus notas de laboratorio, y su frescura y autenticidad quedan patentes incluso hoy. La mayor dificultad de su obra reside en seguir la línea de razonamiento a través de numerosas digresiones y páginas de datos no procesados de temperaturas. En un trabajo leído ante la Real Sociedad británica el 27 de marzo de 1800, Herschel llamó «calor radiante» al calor percibido a distancia, una denominación que resulta apropiada aún hoy. El término «infrarrojo» no formó parte del vocabulario científico

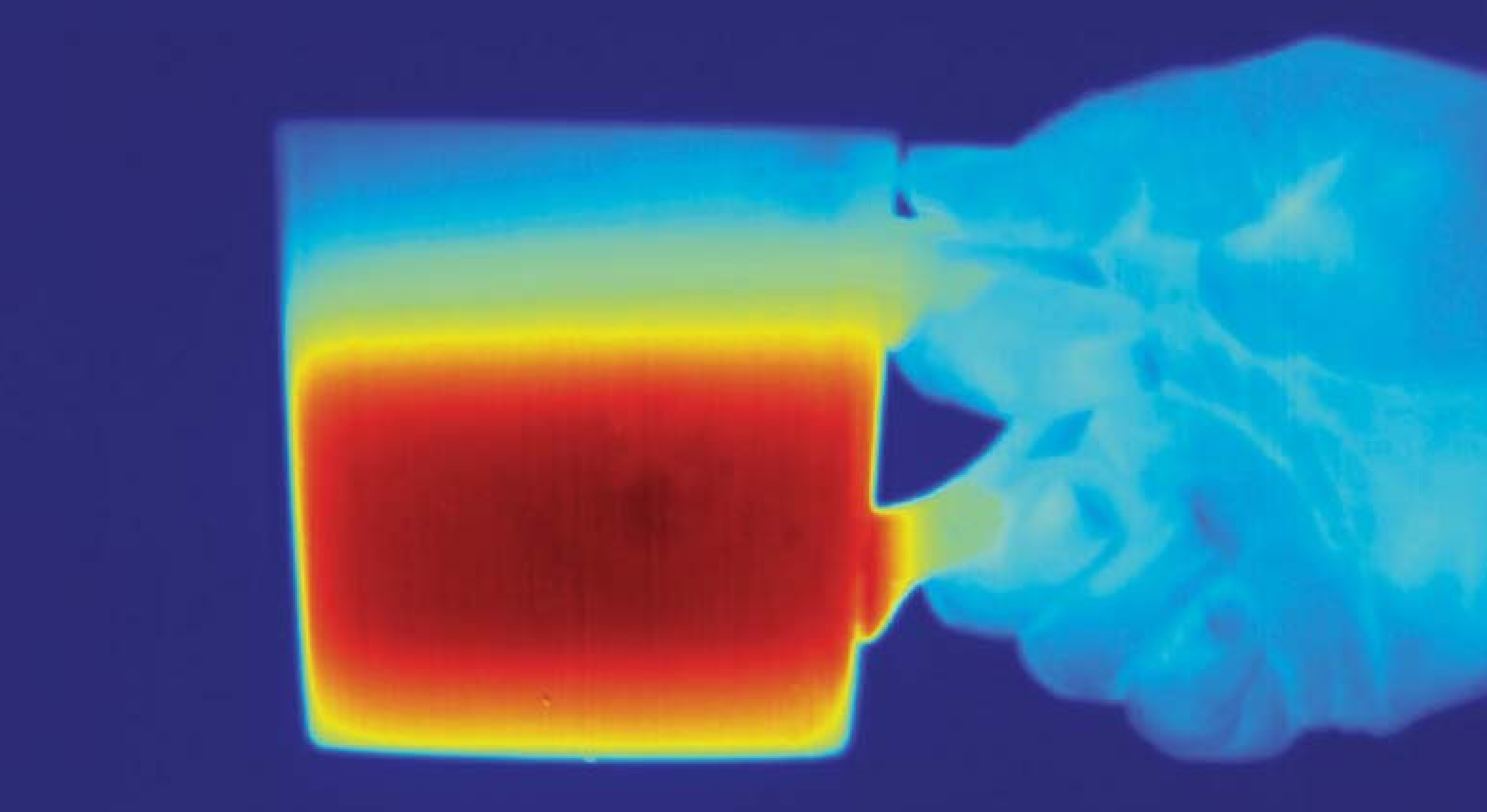
EN SÍNTESIS

Aunque alcanzó su fama como astrónomo, William Herschel llevó a cabo los primeros estudios sobre la región invisible del espectro electromagnético. Es considerado el descubridor de la radiación infrarroja.

Al descomponer la luz solar con un prisma y medir el calentamiento que provocaban los diferentes colores, Herschel se percató de que la zona situada más allá del rojo presentaba una mayor temperatura.

En un principio, el astrónomo sostuvo que la luz visible y el «calor radiante» debían corresponder a dos manifestaciones del mismo fenómeno. Más tarde, sin embargo, puso en duda sus propias conclusiones.

Las investigaciones de Herschel sobre la naturaleza del espectro electromagnético ponen de relieve la importancia de la percepción sensorial humana en el descubrimiento científico.



HOY SABEMOS que tanto la radiación infrarroja como la luz visible forman parte del espectro electromagnético. Sin embargo, no se trata de una conclusión obvia. En 1800, gracias a una curiosidad insaciable y a su pericia como experimentador, William Herschel consiguió relacionar estas dos fuentes de energía de apariencia tan desigual. Esta imagen reproduce en colores falsos la radiación infrarroja emitida por una taza caliente.

CORTESÍA DEL AUTOR

hasta los años ochenta del siglo xix; sin embargo, se desconoce quién acuñó el nombre.

Herschel no comenzó su carrera como científico. De ser un inmigrante alemán anónimo en una banda militar, pasó a convertirse en un notable músico y compositor. En 1773, a la edad de 34 años, y seis años después de trasladarse a Bath para hacerse cargo de una plaza de profesor de música y concertista, hizo algo que cambiaría su vida y su destino: adquirió un pequeño telescopio y un libro de astronomía. Un año después ya pulía sus propios espejos para construir mayores y mejores telescopios, con los que pasaba las noches estudiando los cielos. La destreza de Herschel hizo que su afición se trocase muy pronto en reconocimiento público: poco tiempo después ya era considerado el mejor fabricante de telescopios de su época.

Su fama tocó techo con el descubrimiento del planeta Urano, en 1781, lo que le mereció su designación como astrónomo real. Una vez en el cargo, al que acompañaba un sueldo anual de 200 libras esterlinas, Herschel pudo dedicar todo su tiempo a la astronomía. Él y su hermana, Caroline, se asentaron en la localidad de Slough, cerca del castillo de Windsor. El nombramiento le obligaba a estar disponible siempre que el rey Jorge III y la familia real deseasen ver las estrellas.

La incursión de Herschel en el estudio de la radiación infrarroja se debió a una circunstancia fortuita en su empeño por encontrar mejores filtros para observar el Sol sin correr riesgos. Sus cábalas y conclusiones fueron a menudo contradictorias. Un gran número de ellas resultaron erróneas, pero otras revelaban una clarividencia extraordinaria. La crónica de los experimentos de Herschel narra el papel de la percepción humana en el descubrimiento científico y el conflicto entre las creencias tradicionales y los nuevos conceptos.

CALOR Y LUZ

El espectro electromagnético se extiende desde los rayos gamma, con longitudes de onda inferiores al diámetro atómico, hasta las ondas de radio, cuyas longitudes de onda pueden alcanzar miles de kilómetros. Sin embargo, los humanos solo podemos percibir de forma directa la radiación en dos pequeñas bandas. Nuestros ojos ven la luz comprendida en el diminuto intervalo que media entre los 0,4 y los 0,7 micrómetros, situado cerca del máximo que presenta el flujo solar. Nuestra piel, por su parte, siente sobre todo el calor de la radiación infrarroja. Esta abarca desde la luz visible hasta los 1000 micrómetros, donde comienza la banda de microondas.

La frontera entre la luz visible y la radiación infrarroja queda determinada por el límite perceptivo del ojo humano para las longitudes de onda largas. La experiencia cotidiana jamás nos haría pensar que ambas pertenecen a la misma clase de energía. De hecho, dos convincentes argumentos nos llevarían a extraer la conclusión contraria. En primer lugar, percibimos una y otra por medio de dos órganos sensoriales muy distintos; la luz visible se nos presenta en forma de colores, mientras que la radiación infrarroja provoca la sensación de calor. Pero, además, una y otra no siempre van juntas. La mayoría de las fuentes de luz visible emiten también en el infrarrojo, pero este aparece a menudo sin la compañía de la luz visible. Un ejemplo

cotidiano lo hallamos en una parrilla eléctrica cuya temperatura aún no basta para hacerla brillar. Aunque la habitación se encuentre a oscuras podremos sentir el calor que irradia, pero no podremos verlo.

Quizá tales diferencias expliquen por qué se tardaron tantos siglos en establecer una relación entre ambos fenómenos, a pesar de los abundantes indicios experimentales disponibles. De hecho, que ese vínculo resultase tan contrario a la intuición tal vez sea la causa de que su descubrimiento llegase casi por accidente y de la mano de un investigador que no había recibido una educación científica formal.

Herschel había estado observando irregularidades en la superficie del Sol durante años. En 1794 presentó en la Real Sociedad un artículo sobre el Sol y las estrellas fijas. Estudiar las manchas solares con un gran telescopio sin sufrir daño en los ojos suponía desde hacía tiempo una dificultad. Tras experimentar con diferentes combinaciones de vidrio coloreado y oscurecido, Herschel escribió en su artículo:

Lo que resultó notable fue que, al usar algunos de ellos, noté una sensación de calor, si bien tenía muy poca luz; al mismo tiempo, otros me dieron mucha luz, sin apenas sensación de calor.

Esta observación le llevó a pensar que diferentes colores «tendrían el poder de calentar los cuerpos con una distribución muy desigual entre ellos». Herschel razonó que, si la potencia de calentamiento no se distribuía por igual entre los diferentes colores, lo mismo ocurriría con la potencia luminosa. Por tanto, tal vez existiese un color óptimo para ver y otro que produjese el máximo calentamiento. Conocer dichas propiedades le ayudaría a encontrar el mejor filtro para observar el Sol.

Sirviéndose de su experiencia en la fabricación de telescopios, Herschel construyó un ingenio para poner a prueba su hipótesis. Fabricó lo que hoy llamaríamos un espectrómetro o, con mayor exactitud, un espectrorradiómetro: un instrumento para medir el flujo radiante en diferentes longitudes de onda. Su primer aparato constaba de tres componentes: un prisma colocado en una ventana orientada hacia el sur para captar la luz solar y descomponer los colores sobre una mesa; un pequeño panel de cartón con una rendija, cuya anchura solo dejaba pasar un color; y tres termómetros de mercurio (de los que usó dos) con los bulbos ennegrecidos para lograr una mejor absorción de la luz.

En 1800 los termómetros no eran un instrumento cotidiano, pero Herschel poseía uno y pidió prestados otros dos a un compañero. Colocó uno bajo la luz y mantuvo los otros dos en la oscuridad para medir la temperatura ambiente de la habitación. Comprendió que había «causas» que actuaban «de forma diferente» (en otras palabras, conducción y convección), las cuales influían en la estabilización de los termómetros. Herschel deseaba cuantificar el calentamiento causado solo por la luz.

Los espectrómetros actuales gozan de mucha más resolución, una mayor sensibilidad y una respuesta más rápida, pero sus elementos básicos son los mismos. Aún se usan prismas, si bien se obtiene una mayor resolución mediante fenómenos de interferencia. Hoy el detector sería un semiconductor enfriado por técnicas criogénicas, mucho más pequeño, más rápido y más sensible que un termómetro de mercurio. A pesar de todo, el instrumento diseñado por Herschel produjo, en las manos de un cuidadoso experimentador como él, unas medidas sorprendentemente exactas.

Con su dispositivo a punto en un día soleado, Herschel realizó sus mediciones de temperatura de forma muy metódica, comparando en primer lugar las lecturas de los termómetros a temperatura ambiente para asegurarse un valor de referencia. En la habitación hacía frío: sus temperaturas de partida promediaban 6,4 grados centígrados. Tras algunas pruebas, decidió dejar expuesto a la luz su propio termómetro, con un bulbo de 1,25 centímetros, mientras que empleó el mayor de los prestados para registrar la temperatura ambiente.

Herschel colocó el termómetro de medida en la banda de luz colorada. En cada color permitió que el termómetro se estabilizase durante 10 minutos antes de tomar la lectura. Comenzó sus medidas en rojo, donde obtuvo un incremento medio de 6⅞ grados Fahrenheit (3,8 Celsius) por encima de la temperatura ambiente. El verde arrojó 3¼ grados Fahrenheit (1,8 Celsius), y el violeta, apenas 2 grados Fahrenheit (1,1 Celsius). A partir de estos datos, Herschel concluyó que había demostrado su hipótesis sobre la distribución desigual del calentamiento a lo largo del espectro, lo que le permitía pasar al experimento relativo a la iluminación. Su conclusión inicial rezaba así:

Esto demuestra que la potencia de calentamiento de los colores prismáticos está muy lejos de encontrarse igualmente dividida, y que los rayos rojos son muy prominentes al respecto.

Para hallar el máximo de iluminación, dirigió los colores hacia una variedad de pequeños objetos que observó a través de un microscopio de 27 aumentos. A partir del brillo y la calidad de lo que vio, juzgó la iluminación relativa. Ello también dio sus frutos. Efectuó diez experimentos independientes en los que observó objetos en diferentes colores. Intentó distinguir entre el color que causaba la máxima

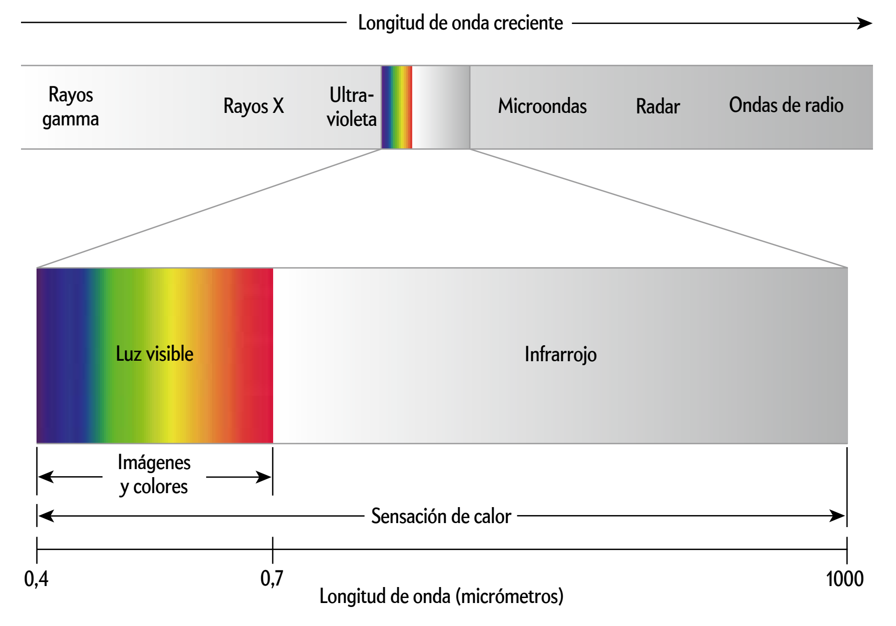


SIR WILLIAM HERSCHEL retratado por Lemuel Francis Abott en 1785, cuando el astrónomo contaba 47 años.

NATIONAL PORTRAIT GALLERY, LONDRES



Jack R. White ha investigado en el campo de la radiometría infrarroja durante 46 años. Antiguo director del Grupo Avanzado de Medidas de Radiación Infrarroja del Departamento de Defensa de EE.UU., trabaja en la actualidad como consultor de análisis radiométricos en el infrarrojo.



EL ESPECTRO electromagnético abarca desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Sin embargo, los seres humanos solo podemos percibir de manera directa dos pequeños segmentos. Nuestros ojos reaccionan a la luz visible, una estrecha banda situada cerca del máximo del flujo solar. Y nuestra piel siente el calor que genera en ella gran parte del espectro, si bien resulta especialmente sensible al causado por la luz infrarroja. Por sí sola, nuestra experiencia cotidiana jamás nos haría pensar que se trata de dos fenómenos de idéntica naturaleza.

iluminación y el que permitía una mejor resolución, o «perceptibilidad». Si bien no alcanzó una conclusión sobre esta última, en lo referente a la iluminación enunció:

> *El máximo de iluminación se encuentra en el amarillo más brillante o el verde más pálido. El verde en sí resulta casi igual de brillante que el amarillo; pero, a partir del verde más oscuro, la potencia de iluminación desciende de manera muy acusada.*

Se trata de una observación notable. El verde-amarillo se acerca a la longitud de onda para la que el flujo solar es máximo; además, coincide con el color para el que el ojo humano muestra una mayor sensibilidad.

UN DESVÍO FORTUITO

Una vez demostrado que el calor radiante y la luz no se distribuían de forma pareja a través de los colores, y armado con los datos empíricos correspondientes a esas diferencias, Herschel disponía de todo lo que necesitaba para aplicar tales resultados a la observación del Sol. Sin embargo, no procedió a ello de inmediato, sino que, por algún motivo, regresó a los datos de temperatura. Algo le incomodaba en ellos. Tal y como esperaba, las lecturas arrojaban resultados diferentes para cada color. Sin embargo, mostraban algo que no había aventurado: una tendencia, en lugar de un pico. El calentamiento era mayor en el rojo, pero la curva no parecía alcanzar su máximo en el espectro visible. En su lugar, parecían apuntar hacia alguna zona en la región oscura situada más allá del rojo.

El astrónomo se sintió impulsado a explorar esa tendencia. Si el máximo quedaba fuera del espectro visible, entonces el calentamiento no se debía a luz, sino a algo más. Herschel empleó la expresión «luz invisible» en un párrafo en el que dejaba claro que también él entendía que se trataba de un oxímoron:

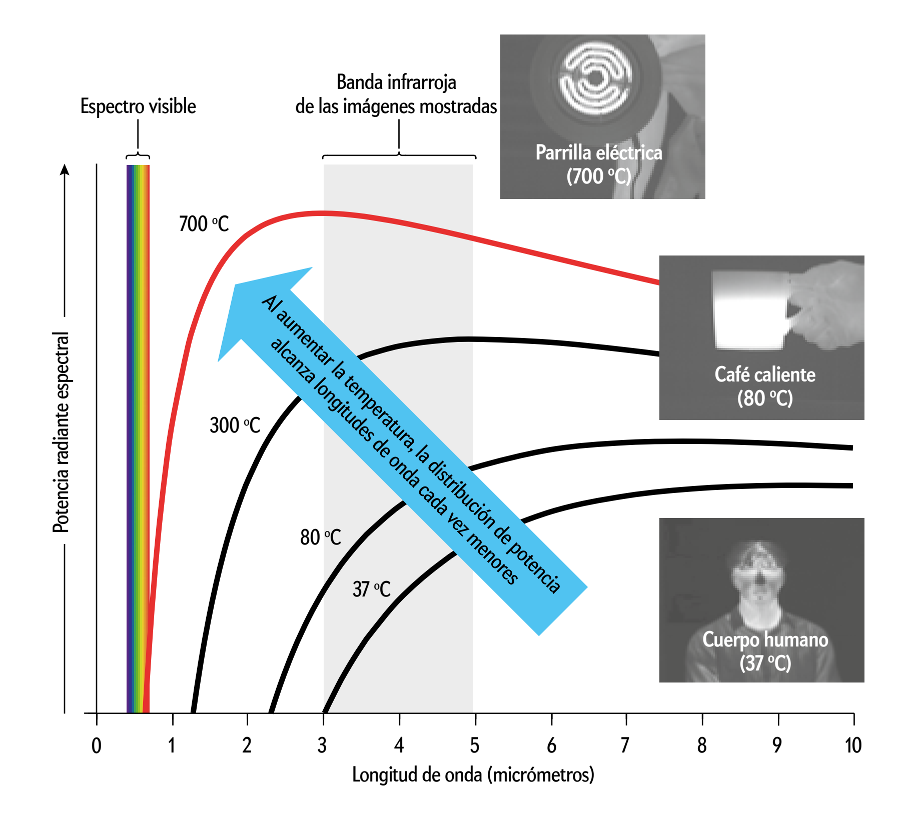
> *Del mismo modo, concluyo que el rojo puro queda aún por debajo del máximo calor, el cual tal vez se sitúe incluso un poco más allá de la refracción visible. En tal caso, el calor radiante consistirá, al menos parcialmente —si no en su mayor parte— de luz invisible, si se me permite la expresión; es decir, de rayos procedentes del Sol, pero cuyo momento los tornaría inadecuados para la visión.*

Al describir los rayos en términos de momento, Herschel no estaba anticipando los descubrimientos de la física cuántica, que aún habrían de demorarse un siglo (los fotones de radiación infrarroja poseen menos energía que los de la luz visible, por lo que, en efecto, poseen «un momento que los torna inadecuados para la visión»). El astrónomo no miraba un siglo hacia el futuro, sino hacia los experimentos que Isaac Newton había llevado a cabo a finales del siglo XVII. Herschel aceptaba sin rechistar las ideas de Newton sobre la naturaleza corpuscular de la luz. Aunque Christiaan Huygens, contemporáneo de Newton, había aportado argumentos convincentes en favor de la hipótesis ondulatoria, el pensamiento de la época —especialmente en Gran Bretaña— se hallaba dominado por la creencia de que la luz se componía de partículas diminutas. Dicho punto de vista cambiaría durante los siguientes quince años; pero, en aquel momento, Herschel concebía la luz como formada por pequeños cuerpos, los cuales ejercían sus efectos sobre la materia con mayor o menor «efectividad».

Más que la existencia de esos rayos invisibles, lo que realmente interesaba a Herschel eran sus propiedades. Para él, quedaba claro que el calor radiante compartía las mismas propiedades de «refrangibilidad» (refracción, en jerga moderna) y dispersión que la luz visible. La refracción hace referencia al cambio en la dirección de propagación de un rayo cuando entra o sale de un medio transparente, como al pasar del aire al vidrio. La dispersión designa la refracción de múltiples longitudes de onda, lo que provoca que cada color se refracte en un ángulo distinto. Los efectos de la dispersión se aprecian de ordinario en los arcoíris y en los prismas. Herschel no pensaba en la luz en términos de longitudes de onda. Pero, como fabricante de lentes, sí estaba familiarizado con los efectos de la dispersión y con la forma de corregirlos, a fin de tallar lentes que minimizasen lo que hoy llamamos aberración cromática (el efecto por el que cada color converge en un foco distinto). Tal y como escribió:

> *Ahora debo señalar que mis experimentos anteriores clarifican, más allá de toda duda, que el calor radiante —así como la luz, ya sean el mismo o diferente agente— no solo es refrangible, sino que también se halla sujeto a las leyes de la dispersión, las cuales surgen de su distinta refrangibilidad.*

SIGMA XI, AMERICAN SCIENTIST



HERSCHEL hubo de superar varias barreras conceptuales para relacionar la luz visible y el calor radiante. Si ambos compartían una misma naturaleza, esperaríamos encontrarlos juntos. A menudo, sin embargo, el calor radiante no va acompañado de luz visible. Así ocurre, por ejemplo, con una taza de café (*centro*) o el cuerpo humano (*abajo*). Gracias a la mecánica cuántica, desarrollada un siglo después de los hallazgos de Herschel, hoy sabemos que la distribución espectral de una fuente térmica se desplaza hacia menores longitudes de onda a medida que aumenta la temperatura (*flecha azul*). Solo a partir de unos 700 grados centígrados comienzan las emisiones a adentrarse en la zona visible del espectro (*arriba*). Las imágenes infrarrojas reproducidas aquí se tomaron en el intervalo de longitudes de onda sombreado.

Como fabricante de telescopios, Herschel captó de inmediato la importancia de aquel hallazgo. Si la luz y el calor radiante poseían las mismas propiedades ópticas, si presentaban la misma conducta en sus interacciones con la materia, ¿acaso no compartirían una misma naturaleza? Al respecto señaló:

> *¿No puede esto llevarnos a conjeturar que el calor radiante consta de partículas de luz que poseen un cierto intervalo de momentos, y que ese intervalo de momentos se extiende un poco más allá, a ambos lados de la refrangibilidad, que el de la luz?*

La pregunta dominó los pensamientos y el empeño de Herschel durante gran parte de aquel año. Debió de haber trabajado con rapidez, porque, tan solo nueve días después de escribir su primer trabajo y diez días antes de su presentación formal, escribió un segundo artículo más corto: «Experimentos sobre la refrangibilidad de los rayos invisibles del Sol». El título trae a la memoria la obra de Newton. En su *Óptica* de 1730, la proposición II del teorema II rezaba: *La luz del Sol consta de rayos diferentemente refrangibles*.

Sin duda, Newton ejerció una gran influencia sobre Herschel. Los experimentos del astrónomo recordaban a los que Newton había llevado a cabo tiempo atrás para proyectar, con la ayuda de un prisma colocado en la ventana, los colores sobre la pared. Herschel se hizo con el método cualitativo de Newton y lo transformó en un instrumento cuantitativo. Puede que —con toda la razón— sintiese que estaba continuando los trabajos de Newton sobre los colores de la luz, al extender el concepto de «diferente refrangibilidad» a los rayos solares situados más allá de los colores visibles.

Herschel comenzó su segundo experimento modificando de manera sutil su espectrómetro para tomar lecturas de temperatura en la zona oscura del tablero, más allá del rojo. Su única referencia era la posición de los colores, por lo que trazó cinco líneas paralelas separadas 1,25 centímetros en una hoja de papel blanco e hizo coincidir la primera de ellas con el borde de luz roja. A partir de la frontera del espectro visible, Herschel se aventuró en la oscuridad situada más allá.

Tomó las lecturas del termómetro y observó una tendencia ascendente hasta llegar a un máximo, más allá del cual la temperatura comenzaba a disminuir. El tono del segundo trabajo de Herschel refleja entusiasmo y confianza en sus hallazgos, si bien aventura algunas opiniones que los datos no apoyaban con firmeza. Concluyó su artículo con un argumento de corte filosófico:

> *Para terminar, si llamamos luz a los rayos que iluminan los objetos, y calor radiante a aquellos que calientan los cuerpos, podemos preguntarnos si la luz difiere, en su esencia, del calor radiante. Como respuesta sugeriría que no se nos permite, de acuerdo con las reglas de la práctica filosófica, admitir dos causas diferentes para explicar ciertos efectos, si estos pueden explicarse con una.*

PRIMERAS OBJECIONES

Aunque la gran reputación de Herschel como astrónomo debió contribuir a que la mayoría de los científicos de la época acogiesen su trabajo con buenos ojos, no todos lo hicieron. Su tercer artículo se abre con una nota de marcado carácter defensivo. Parece haber sufrido los ataques de «un célebre autor», a quien no agradaba el término «calor radiante». El detractor pudo haber sido John Leslie, considerado una autoridad sobre el calor. Sin duda, Leslie se sintió agraviado por la intrusión en su campo de un aficionado. En una carta publicada en *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, escribió:

> *Se diría que este competente astrónomo, al entrar en una nueva línea de investigación, ni ha empleado el aparato preciso para la belleza de la materia ni ha tomado precauciones suficientes frente a las numerosas y latentes*

fuentes de error. Me considero indicado para hablar con la mayor confianza, pues hace tiempo que vengo orientando mis investigaciones en la misma dirección, [...] No dudo, por tanto, en mantener que la principal proposición del Dr. Herschel se origina en observaciones falaces, [...] Y cualesquiera que fueran mis sentimientos con respecto a la validez de las conclusiones, decidí calmada e imparcialmente someter los pretendidos hechos a la prueba de la experimentación. Cuando se colocó un fotómetro más allá del espectro [...] no se percibió efecto alguno.

Si en verdad el termómetro diferencial de Leslie (lo que él llamó «fotómetro») no detectó calentamiento más allá del espectro visible, como reivindicaba, se hallaba en un grave error. La cuestión quedó demostrada más tarde de forma concluyente por experimentos independientes realizados por la Real Sociedad. Para atemperar las críticas, Herschel sustituyó el término «calor radiante» por el de «rayos que causan calor».

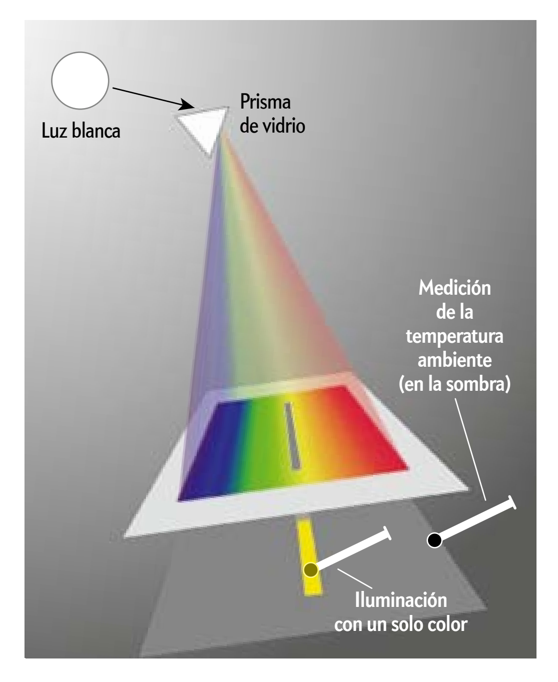
La luz también fue objeto de conflicto. Las audaces afirmaciones de Herschel sobre el calor radiante y la luz chocaban con la creencia tradicional. Aquí adoptó de nuevo una postura cautelosa, pero en esta ocasión argumentó con un desafío calculado para silenciar a sus críticos:

También he de señalar que, al usar la palabra rayos, no pretendo contradecir, ni mucho menos sancionar, la opinión de aquellos filósofos que aún creen que la luz nos llega desde el Sol no en forma de rayos, sino mediante las supuestas vibraciones de un éter elástico, difundido por todas partes a través del espacio; solo reivindico, para los rayos que producen calor, el mismo privilegio que ellos estén dispuestos a conceder a los rayos que iluminan los objetos.

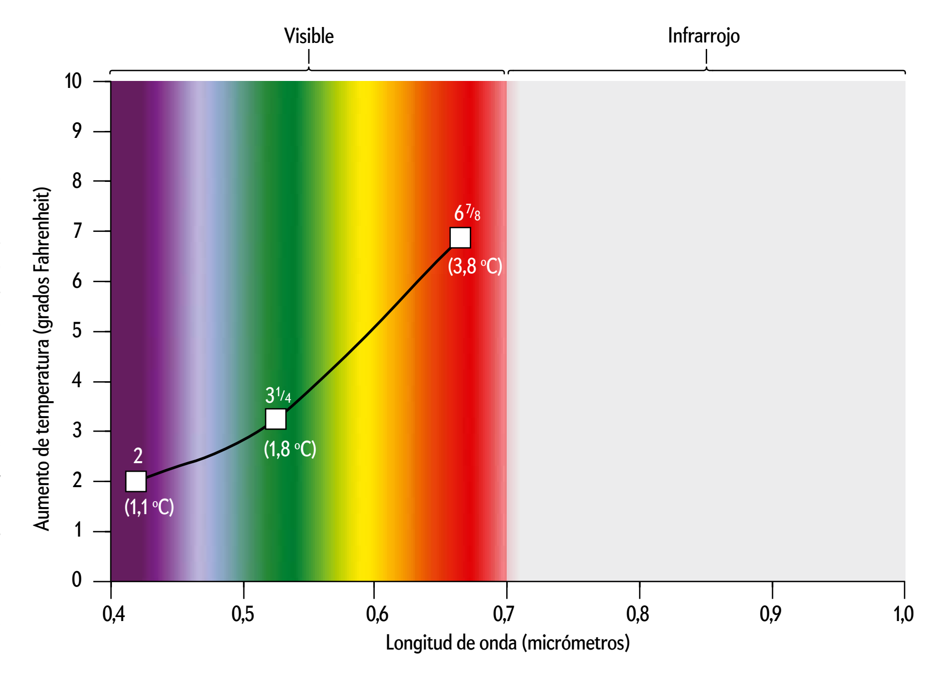
Aunque las críticas no repercutieron en el ritmo de sus experimentos, puede que aquellos ataques sí hiciesen mella. En la segunda parte de su último artículo, el énfasis inicial por encontrar pruebas que apoyasen la similitud entre luz y calor radiante se convirtió en un empeño por dejar claras sus diferencias.

El tercer artículo de Herschel proponía siete comparaciones entre la luz y el calor radiante. La primera hacía referencia a dos sentidos humanos. Las cinco siguientes trataban sobre las interacciones con la materia conocidas en 1800: reflexión, refracción, «diferente refrangibilidad» (dispersión), transmisión a través de «cuerpos diáfanos» (medios transparentes) y dispersión por superficies rugosas. La última se cuestionaba si el calor radiante lograría estimular la visión en caso de alcanzar la intensidad suficiente. Se trata de una pregunta trascendental, ya que una respuesta completa explicaría por qué la luz visible suele ir acompañada de radiación infrarroja, mientras que esta última puede presentarse sola. Con su decimoctavo experimento, Herschel demostró más allá de toda duda que un aumento de la potencia no tornaría visible la radiación infrarroja.

Herschel se embarcó en un extenso programa de fabricación de instrumentos para examinar y medir cada propiedad. Al prisma y los termómetros de mercurio añadió una variedad de lentes y espejos, con una docena de configuraciones diferentes y un extenso conjunto de materiales transparentes para comparar la transmisión. Más de 200 experimentos le permitieron llenar páginas y páginas de datos obtenidos con todas las fuentes de

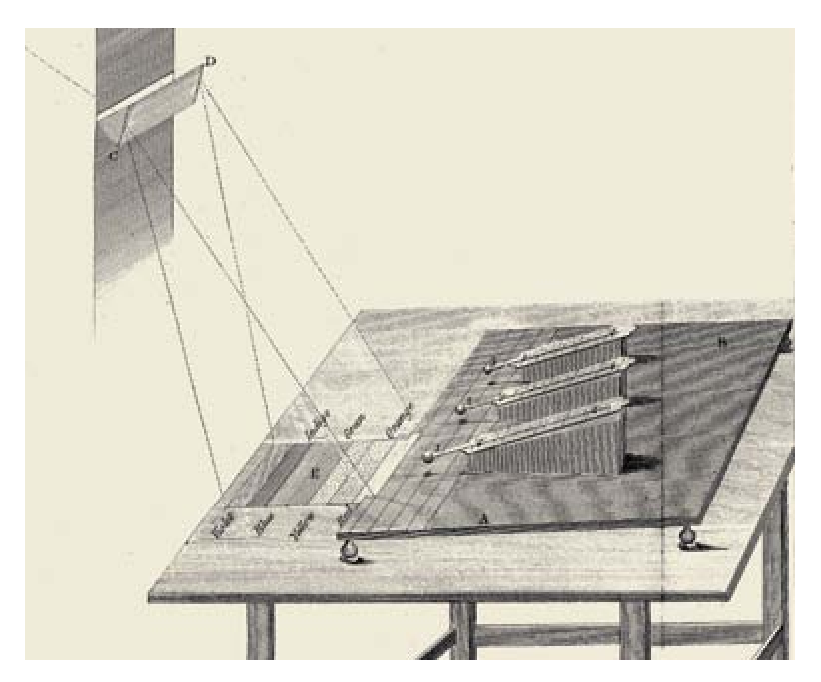


EN SUS EXPERIMENTOS del año 1800, Herschel dirigió la luz descompuesta por un prisma sobre un cartón en el que una rendija dejaba pasar un único color. Para medir el calentamiento relativo, colocó un termómetro sobre la región iluminada y mantuvo otro en la sombra.



CON SUS PRIMERAS mediciones, Herschel creyó haber demostrado que la capacidad de calentamiento asociada a la luz no se distribuía de modo uniforme a lo largo del espectro visible, pues la mayor temperatura se observaba en el rojo. Las medidas parecían apuntar hacia algún máximo situado más allá del rojo, en la región oscura.

SIGMA XI, AMERICAN SCIENTIST



PARA EXPLORAR EL CALENTAMIENTO en la región situada más allá del rojo, Herschel tuvo que modificar sus instrumentos, tal y como muestra este grabado de uno de sus artículos de 1800. Carente del concepto de longitud de onda, su única referencia era la frontera de la banda visible. Trazó cinco líneas paralelas y colocó el tablero de forma que el borde del rojo coincidiera con la primera de ellas. Observó que la temperatura aumentaba hasta un máximo situado más allá de ese color. El experimento demostraba que el calor radiante poseía las mismas propiedades ópticas que la luz.

iluminación disponibles, observadas a través de diferentes combinaciones de espejos, prismas y lentes. Confirmó, una y otra vez, y por todos los medios a su alcance, que la luz y el calor radiante compartían las mismas propiedades ópticas.

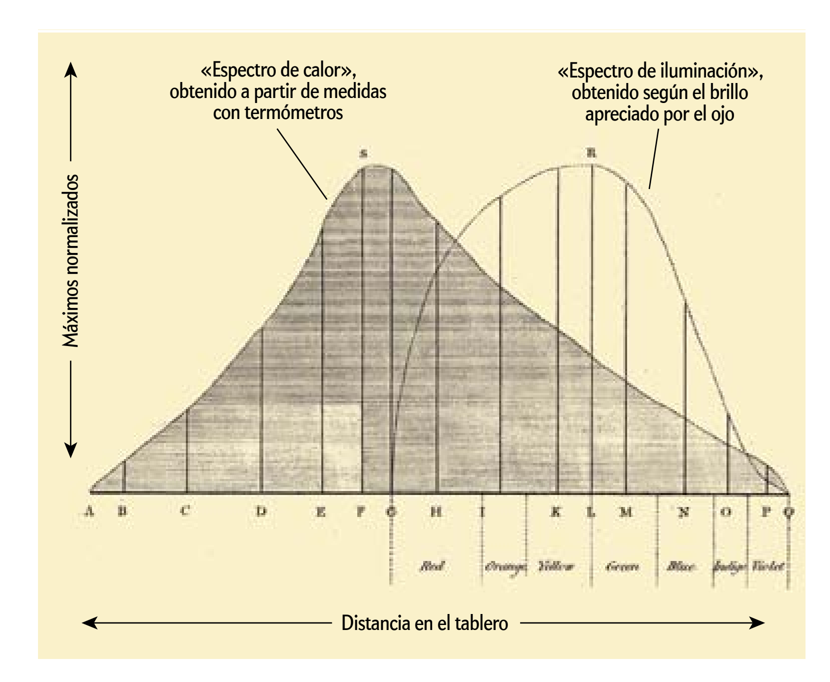
El frenético ritmo de sus últimos experimentos pudo haber sido la causa de que no advirtiese o malinterpretase algunas relaciones entre ambos fenómenos, sobre todo después de que comenzase a buscar diferencias en lugar de parecidos. Llevó a cabo un minucioso experimento con el que logró demostrar que la longitud focal de una lente convergente refractiva era mayor para el calor que para la luz, pero no se percató de que esa diferencia en la longitud focal se debía al mismo fenómeno de dispersión que había observado en el prisma.

Midió los efectos de la dispersión y halló, con acierto, que la luz visible se dispersaba más que la radiación infrarroja. Pero, en lugar de interpretarlo como una prueba de las semejanzas entre una y otra en su interacción con la materia (puesto que la dispersión depende de la longitud de onda), lo atribuyó a la distinta naturaleza del calor y de la luz. Herschel carecía de los conocimientos científicos necesarios para explicar las causas de tales fenómenos. Además, experimentaba dificultades a la hora de formular las descripciones matemáticas de sus hallazgos. Sus puntos fuertes eran un conocimiento práctico de la óptica, destreza en la fabricación de instrumentos y capacidad de observación.

Su último artículo, presentado el 6 de noviembre de 1800, incluía la primera gráfica jamás dibujada sobre la distribución espectral de la luz visible y la radiación infrarroja. Llamó a esas curvas «espectro de iluminación» y «espectro de calor». En el eje vertical, Herschel representó la temperatura medida y el brillo percibido. Situó ambos máximos a la misma altura (un método llamado normalización de pico) para comparar la extensión relativa, la forma de las distribuciones y la posición de los máximos. En el eje horizontal, al no disponer del concepto de longitud de onda, empleó la distancia con respecto al lugar en el que se hallaban los colores visibles (como resultado, dicho eje se encontraba invertido con respecto a la convención actual de situar las longitudes de onda en progresión creciente de izquierda a derecha).

La gráfica de Herschel era el producto de la imaginación, la percepción y meses de incansable trabajo, pero resultaba fatalmente engañosa. Su aspecto acaso le convenciese de que, después de todo, la naturaleza de la luz difería de la del calor radiante. Según escribió («área *ASQA*» se refiere al espectro de calor; «área *GRQG*» al luminoso):

> *Una simple inspección de ambas figuras [...] nos permitirá ver ahora cómo el prisma dispersa de manera muy diferente los rayos productores de calor y aquellos que causan iluminación sobre las áreas ASQA y GRQG de*



EL ÚLTIMO DE LOS ARTÍCULOS de Herschel sobre el calor radiante incluía la primera distribución de lo que él llamó «espectro de iluminación» y «espectro de calor». Sin embargo, las cantidades físicas que muestran las curvas (brillo y temperatura) guardan muy poca relación entre sí. Ello condujo al afamado astrónomo a concluir, erróneamente, que los rayos de luz y el calor radiante eran de distinta naturaleza.

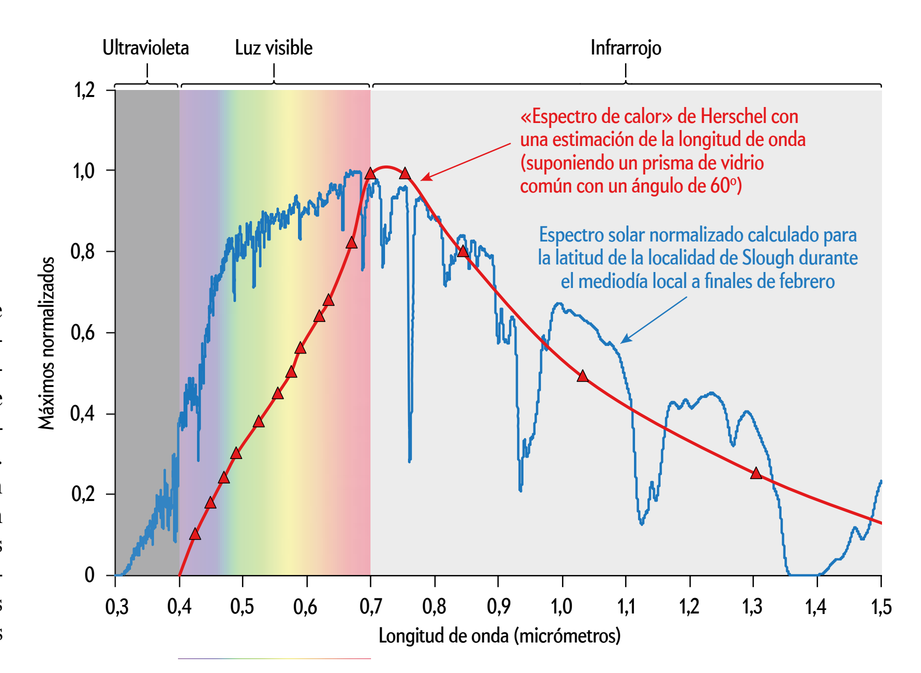
DE: «EXPERIMENTS ON THE REFRANGIBILITY OF THE INVISIBLE RAYS OF THE SUN», POR WILLIAM HERSCHEL, *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY*, VOL. 90, 1800 (*grabado*); DE: «EXPERIMENTS ON THE SOLAR, AND ON THE TERRESTRIAL RAYS THAT OCCASION HEAT; WITH A COMPARATIVE VIEW OF THE LAWS TO WHICH LIGHT AND HEAT, OR RATHER THE RAYS WHICH OCCASION THEM, ARE SUBJECT, IN ORDER TO DETERMINE WHETHER THEY ARE THE SAME, OR DIFFERENT», PARTE II, POR WILLIAM HERSCHEL, *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY*, VOL. 90, 1800. (*gráfica*)

nuestros dos espectros. Estos rayos no coinciden en su refrangibilidad media ni en la posición de sus máximos. En R, donde la luz es máxima, hay solo un poco de calor; y en S, donde tenemos el máximo calor, ¡no hallamos luz en absoluto!

REINTERPRETAR LOS DATOS

La presentación de los datos influye de manera notable en su interpretación. Incluso hoy, resulta difícil contemplar la gráfica de Herschel sin sacar la impresión de que la luz visible y el calor radiante corresponden a dos tipos diferentes de rayos. Ambas curvas son exactas, pero muestran cantidades distintas que casi no guardan ninguna relación mutua, por lo que jamás deberían representarse en la misma gráfica. El error de Herschel no estaba en los datos, sino en la suposición de que ambas curvas podían compararse.

Para juzgar la calidad de los espectros obtenidos por Herschel, necesitaríamos conocer cómo incidían los rayos solares sobre la localidad de Slough durante la época en que efectuó sus medidas. Herschel no tomó nota de la fecha ni de la hora, pero un análisis del perfil de la curva nos indica que los datos probablemente procediesen de sus primeros experimentos. De ser el caso, debieron tomarse algún día de finales de febrero o principios de marzo. Slough se encuentra a una latitud de 51,5 grados norte, por lo que el cenit solar debía situarse a unos 61 grados (29 grados sobre el horizonte) en el mediodía local. Si las medidas de Herschel se hubiesen realizado en verano, el máximo se habría situado más próximo al centro del espectro visible. Pero, en invierno, con un camino atmosférico más largo, el máximo de la irradiancia espectral (la densidad de potencia incidente en función de la longitud de onda) se encuentra desplazado hacia el rojo debido a la dispersión atmosférica de las longitudes de onda menores.



UNA COMPARACIÓN entre el «espectro de calor» obtenido por Herschel (*rojo*) y el espectro solar real (*azul*) da fe de la exactitud de sus medidas. Debido a la curva de dispersión del vidrio (un efecto imposible de corregir en aquella época), estas se hallaban desplazadas hacia la región de longitudes de onda mayores. Con todo, la continuidad de la curva al pasar del visible al infrarrojo apoyaba de manera contundente la hipótesis de la naturaleza común de la luz y el calor radiante.

La distribución de la irradiancia solar que debió de iluminar el prisma de Herschel puede calcularse con ayuda de una simulación informática de la atmósfera. Los resultados certifican que el astrónomo fue muy meticuloso a la hora de registrar las temperaturas, pero, aunque poseía varios prismas (de vidrio común y vidrio de plomo, con distintos ángulos), no dejó constancia de cuál de ellos utilizó en sus primeros experimentos. La curva que se reproduce en este artículo ha sido calculada suponiendo un prisma de vidrio común (los habituales en 1800) con un ángulo de 60 grados. La comparación muestra que Herschel realizó unas medidas de gran calidad, teniendo en cuenta las limitaciones de sus instrumentos y el hecho de que ignoraba por completo qué apariencia debía mostrar el espectro solar.

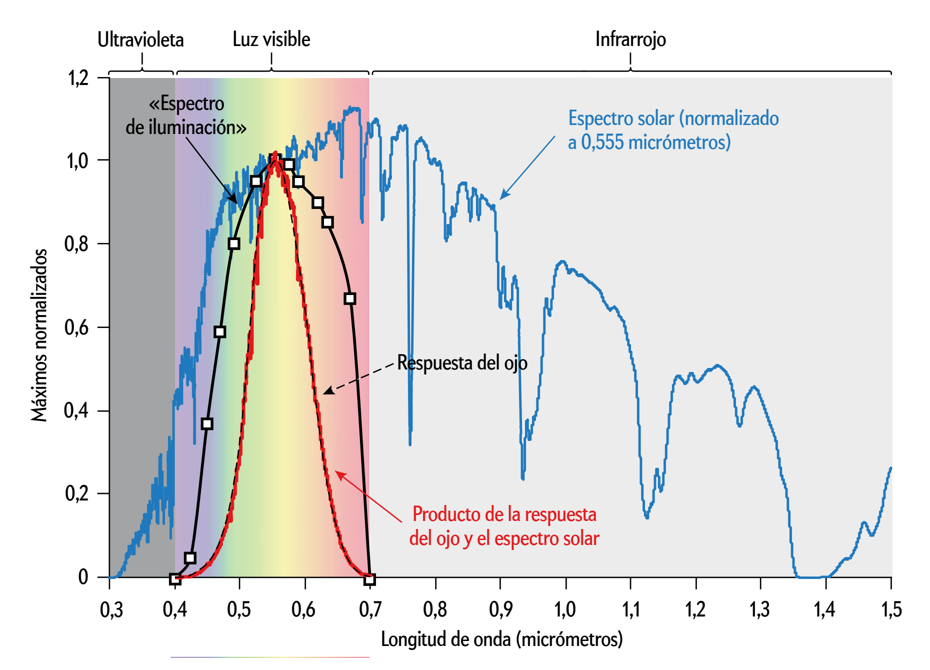
Debido a la dispersión particular del vidrio (la manera en que el índice de refracción cambia con cada color), su gráfica se encontraba desplazada hacia las longitudes de onda mayores. En cada posición, la anchura espectral, o banda de longitudes de onda que recibe el termómetro, se hace progresivamente más ancha a medida que nos movemos hacia longitudes de onda más largas. Una anchura espectral más ancha significa una mayor potencia y, con ello, una mayor temperatura en el termómetro. Como resultado, los datos correspondientes a las longitudes de onda más largas tenían un peso relativo mayor. En los espectrómetros actuales resulta posible corregir tales irregularidades, pero su calibración requiere conocer la longitud de onda con la que estamos trabajando, así como disponer de una fuente conocida de flujo radiante. Sin duda, algo imposible en 1800.

A pesar de todo, ese desplazamiento de la curva de calor puede interpretarse como una casualidad afortunada, pues fue dicho perfil lo que impulsó al astrónomo a explorar la parte invisible del espectro situada más allá del rojo. La curva de Herschel confirmaba su hipótesis de que la potencia calorífica de la luz solar no se distribuía de igual modo por el espectro. Y el hecho de que la gráfica no mostrase una discontinuidad al pasar al infrarrojo apoyaba su segunda suposición; a saber, la naturaleza común de la luz y el calor.

Con respecto al espectro luminoso, Herschel tal vez encontrase apropiado representarlo en la misma gráfica que el espectro de calor, ya que su objetivo original era encontrar un filtro que maximizara la luz y minimizase el calor. Su curva era exacta, pero no mostraba lo que él pensaba. En 1800, Herschel no podía hacer uso de uno de los conceptos fundamentales en radiometría: el efecto de la respuesta del sensor. La lectura de cualquier instrumento, incluido el ojo humano, surge como producto de dos curvas: la distribución de la potencia recibida y la curva de respuesta del instrumento. A falta de dicha noción, Herschel supuso que sus espectros representaban con exactitud la distribución de la radiación.

Cualquier espectro generado a partir de lo que percibe el ojo será nulo fuera de los límites de la visión humana. Dentro de ellos, la potencia recibida en cualquier longitud de onda estará ponderada por la sensibilidad del ojo para dicho color. La sensi-

SIGMA XI, AMERICAN SCIENTIST



TODA MEDICIÓN RADIOMÉTRICA resulta del producto de dos curvas: la distribución espectral de la radiación recibida y la respuesta espectral del sensor. La limitada sensibilidad espectral del ojo humano (*línea punteada*) da lugar a un producto (*línea roja*) cuyo perfil resulta casi idéntico a la curva de respuesta. En consecuencia, el resultado de Herschel (*negro*) constituía más un mapa de la sensibilidad del ojo humano que una representación fiel del espectro solar (*azul*). Su error fue suponer que esta gráfica debería parecerse a la de la temperatura.

bilidad máxima, como bien determinara Herschel, se halla en el verde-amarillo, con una longitud de onda de 0,555 micrómetros. La visión humana del color resulta más compleja, pero la curva que ofrece la Comisión Internacional sobre Iluminación ilustra bien este resultado.

La sensación de visión es tan rica en información que, a menudo, olvidamos lo diminuta que es la porción del espectro electromagnético que nos es dado percibir. Debido a su estrechez, la forma de la curva de respuesta y la de su producto con el espectro solar resultan casi idénticas. Como resultado, el espectro de iluminación de Herschel muestra más un mapa de la respuesta del ojo humano a los diferentes colores que una distribución real de la luz. Él interpretó la forma de su curva como una demostración de que la luz no se reparte por igual en todo el espectro. Se trataba de una hipótesis correcta, pero no porque así lo mostrasen sus datos. Al fin y al cabo, habría obtenido una curva casi idéntica aunque la distribución fuese uniforme.

CONSIDERACIONES ADICIONALES

Hacia noviembre de 1800, Herschel se hallaba muy próximo a lo máximo que podía lograrse con el conocimiento y las técnicas de su tiempo. Y, casi con toda seguridad, se sentía presionado para retornar a sus investigaciones astronómicas. Al final, la apariencia engañosa de su gráfica y las diferencias entre los sentidos asociados a la percepción de la luz y del calor se impusieron sobre sus resultados empíricos y le impulsaron a razonar que, después de todo, ambos tipos de energía bien podrían no compartir la misma naturaleza. En realidad, no parece haber alcanzado nunca una conclusión firme al respecto. Recurriendo de nuevo a argumentos filosóficos, discurrió de la siguiente manera:

No parece que la naturaleza tenga por costumbre usar el mismo y único mecanismo con dos cualesquiera de nuestros sentidos. [...] Entonces, ¿habremos de suponer aquí que, por el contrario, el mismo mecanismo debería constituir la causa de sensaciones tan diferentes como las delicadas percepciones de la visión y las más burdas de todas las afecciones, comunes a las partes más bastas de nuestro cuerpo, cuando se las expone al calor?

Hoy semejante argumento no gozaría de ninguna credibilidad, y puede que ya sonase endeble en 1800. Para Herschel, sin embargo, era una forma de finalizar su búsqueda.

Herschel debió de sentirse decepcionado. Sin embargo, había logrado más de lo que él o ninguno de sus contemporáneos podía imaginar. Descubrió que el calor radiante compartía las mismas propiedades ópticas que la luz. Confirmó su hipótesis de que la potencia de calentamiento no se distribuía de modo uniforme por todo el espectro. Realizó la primera medida radiométrica de la distribución espectral de flujo radiante a lo largo del espectro visible y el infrarrojo, y pudo comprobar que se trataba de una curva suave y continua.

El camino que nos ha conducido hasta la teoría moderna de la radiación electromagnética partió de las mediciones de temperatura de la luz solar efectuadas por Herschel. En 1861, James Clerk Maxwell elaboró una formulación matemática unificada para todo el espectro y, en 1900, Max Planck aportó la primera pieza de su versión cuántica. Herschel no pudo demostrar de manera concluyente que la luz visible y el calor radiante compartían una naturaleza común. Pero sus experimentos, que ya apuntaban con solidez en esa dirección, proporcionaron la primera pieza de un rompecabezas que otros habrían de completar años después.

PARA SABER MÁS

Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and illuminate objects; with remarks, that prove the different refrangibility of radiant heat. To which is added, an inquiry into the method of viewing the Sun advantageously, with telescopes of large apertures and high magnifying powers. William Herschel en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, págs. 255-283, 1800. Disponible en **rstl.royalsocietypublishing.org/content/90/255.full.pdf+html**

Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun. William Herschel en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, págs. 284-292, 1800. Disponible en **rstl.royalsocietypublishing.org/content/90/284.full.pdf+html**

Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat; with a comparative view of the laws to which light and heat, or rather the rays which occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same, or different. Partes I y II. William Herschel en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, págs. 293-326 y 437-538, 1800. Disponibles en **rstl.royalsocietypublishing.org/content/90.toc**

Observations and experiments on light and heat, with some remarks on the enquiries of Dr. Herschel, respecting those objects. John Leslie en *Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, vol. 4, págs. 344-350, 1801.



Emmanuel Gaudry trabaja en el departamento de entomología del Instituto de Investigación Criminal de la Gendarmería Nacional francesa, en Rosny-sous-Bois.



ENTOMOLOGÍA

Insectos necrófagos

Los artrópodos que colonizan un cadáver resultan de gran ayuda para los forenses. El análisis de su desarrollo arroja luz sobre la fecha de la muerte

Emmanuel Gaudry

Una tarde de primavera, los ocupantes de un edificio notan con desagrado un hedor pestilente. Alertado, el portero localiza el origen de las emanaciones: no es el local destinado a las basuras, sino un apartamento del segundo piso. Los bomberos llegan al lugar, revientan la puerta y descubren en la habitación un cuerpo en avanzado estado de descomposición.

La habitación muestra un gran desorden. Sobre la almohada, una revista de televisión de hace tres semanas da una idea de la fecha de la muerte. Durante la autopsia, el médico forense establecerá las causas del fallecimiento, pero no podrá confirmar el período post mórtem: más allá de 24 horas, solo llegará a establecer un tiempo aproximado, pues el estado del cadáver ya no permitirá hacer una estimación precisa. El responsable de la instrucción del caso contacta entonces con entomólogos especializados en investigación criminal.

Estos recogen gusanos o, mejor dicho, larvas de dípteros (orden de insectos que comprende las moscas y los mosquitos), sobre el cadáver, bajo la cama, sobre la alfombra de la habitación... El protocolo de recolección está bien definido: vestidos con una indumentaria blanca, los técnicos depositan los insectos dentro de bocales ya preparados al efecto, toman la temperatura y conservan vivos algunos ejemplares. Para estos últimos el tiempo apremia, pues no deben morir antes de llegar al laboratorio, porque entonces no servirían para nada.

Los especialistas estiman entonces el tiempo transcurrido tras la muerte fundándose en la fisiología del desarrollo de determinados insectos necrófagos, que normalmente colonizan los cadáveres y contribuyen a su descomposición [*véase* «Y en polvo nos convertiremos», por A. A. Vass; Investigación y Ciencia, noviembre de 2010]. Este es el ámbito de la entomología legal, o forense, que permite deducir la fecha de la muerte, información que puede resultar decisiva en una instrucción judicial.

Tal disciplina no se limita a las escenas del crimen. Se ocupa de todos los aspectos del estudio de los insectos (o, más generalmente, de los artrópodos, un tipo filogenético que contiene también las arañas y los ácaros) de los que la justicia puede sacar provecho.

UNA HISTORIA ANTIGUA

Las representaciones artísticas o simbólicas de insectos asociados a la muerte son antiguas y recurrentes. Las más remotas datan de hace 3600 años y proceden de Mesopotamia. Se trata de unos escritos cuneiformes conservados en arcilla que se refieren a moscas «verdes» y «azules» (probablemente, dípteros califóridos necrófagos).

EN SÍNTESIS

Los insectos necrófagos, omnipresentes en la naturaleza, ponen los huevos sobre los cadáveres, a menudo poco tiempo después de la muerte. De ellos nacen larvas, que crecen alimentándose del cadáver.

El análisis de su grado de madurez permite datar el fallecimiento incluso cuando este se remonta a varias semanas.

La entomología legal interviene asimismo en otros casos; cuando un producto está contaminado por insectos, su grado de desarrollo informa de la antigüedad de dicha contaminación.



LAS MOSCAS suelen ser las primeras en llegar a los cadáveres.

En el antiguo Egipto, el *Libro de los muertos* contiene fórmulas para ahuyentar a los necrófagos, es decir, para fabricar insecticidas, con el fin de preservar las momias. Algunos milenios más tarde, el egiptólogo Jean-François Champollion (1790-1832) observó pequeños escarabajos (probablemente *Necrobia*, nombre que significa muerte y vida) entre los dedos de una momia.

En Egipto todavía, se ofrecía a los guerreros, como señal de valentía, amuletos de oro que representaban moscas sarcofágidas. El nombre esta familia hace referencia a la piedra utilizada para construir los sarcófagos y significa «que consume las carnes»; las creencias antiguas atribuían a esa piedra un poder de aceleración de la descomposición de los cadáveres. Además, la pululación de dichos dípteros constituyó una de las Diez Plagas de Egipto.

También en América se hace alusión a los insectos necrófagos. Los mochicas, civilización precolombina que se desarrolló desde el año 100 antes de nuestra era hasta el año 750, representaban sobre cerámicas moscas que daban vueltas alrededor del cuerpo, a veces incluso antes del fallecimiento.

Desde la antigüedad, los insectos se asocian a la muerte. A menudo se designa al diablo, soberano del reino de los muertos, como «Belcebú», término de origen fenicio y hebraico derivado de *Baal Zebub*, que significa señor (o dios) de las moscas. En el poema «Una carroña», incluido en *Las flores del mal*, Charles Baudelaire utiliza las moscas, las larvas y los gusanos para evocar la muerte.

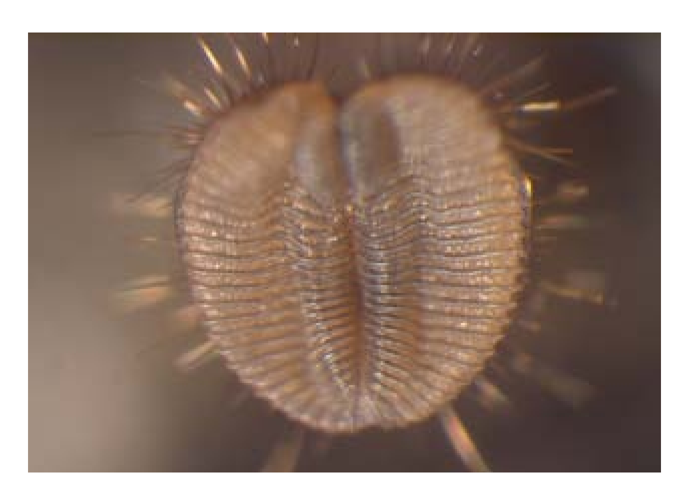
La participación activa de los insectos necrófagos en el proceso de descomposición se conoce desde hace siglos. No obstante, no se había establecido ninguna relación entre los gusanos que colonizaban los cuerpos y la puesta de las moscas. Se pensaba que dichos gusanos aparecían después de la muerte por generación espontánea, creencia que todavía perdura en el inconsciente colectivo. En 1668, Francesco Redi, médico italiano, fue el primero en refutar experimentalmente esta teoría controvertida. Demostró que las larvas que se desarrollaban sobre el cadáver surgían de huevos puestos por hembras de dípteros. En 1767, el biólogo Carl von Linné informó que la progenie de tan solo tres moscas devoraba el cadáver de un caballo a la velocidad de un león. En los siglos XVII, XVIII y XIX, los médicos forenses exhumaron cadáveres enterrados en los que descubrieron artrópodos.

La progenie de solo tres moscas devora el cadáver de un caballo a la velocidad de un león

CUANDO LOS INSECTOS SEÑALAN AL CRIMINAL

La entomología legal no esperó a esos estudios científicos para nacer. El primer caso documentado data del siglo XIII. Un tratado de medicina legal chino de esa época relata la resolución de un asesinato por arma blanca cometido en un arrozal. Personado en el lugar de los hechos, el juez instructor reunió a todos los campesinos provistos de sus respectivas hoces. Sobre la hoja de una de ellas se posaron moscas, atraídas por trazas residuales de sangre; su propietario era, pues, el culpable. Confundido, este confesó su crimen y fue castigado.

La utilización de insectos necrófagos en criminalística para estimar la fecha de la muerte es mucho más reciente. El doctor Louis Bergeret (1814-1893) introdujo la disciplina en Francia en 1850. Ante un cuerpo momificado de recién nacido descubierto en una habitación dedujo, a partir del estudio de los insectos, que la muerte se remontaba a dos años, con lo que estableció la inocencia de los últimos propietarios.



EL BESO DE LA MUERTE. Estos «labios» se hallan en el extremo de la trompa de una mosca necrófaga de la familia Califóridos.

CORTESÍA DEL AUTOR

Otros estudios experimentales, basados en diversos modelos animales (cerdos, perros, gatos o aves), se suceden en la primera mitad del siglo XX. El naturalista Jean-Henri Fabre (1823-1915) describe las legiones de insectos al asalto de un pardillo, o la acción beneficiosa de los necróforos, coleópteros necrófagos que, sepultureros naturales, entierran los cadáveres que alimentarán a su progenie. A partir del final de la Segunda Guerra Mundial, se publican trabajos en Europa y Estados Unidos sobre el tiempo de desarrollo de dípteros necrófagos y sobre su utilidad para la estimación del período post mórtem. Nace la entomología legal moderna.

A diferencia del médico forense, encargado de establecer el instante de la muerte en sentido estricto, el entomólogo forense estima el inicio de la colonización del cuerpo por los insectos, es decir, la fecha, más o menos precisa, de las primeras puestas (ovoposición). Cuando las condiciones son propicias, ambas valoraciones coinciden. Pero en determinados casos, como cuando el cadáver está embalado o enterrado, los insectos no acceden de inmediato al cuerpo. Entonces, la fecha de las primeras puestas ya no se corresponde con la del fallecimiento.

EL CADÁVER, UN ECOSISTEMA

Un cadáver constituye una fuente de alimento, un lugar de reproducción o un refugio para toda una fauna de invertebrados, que lo reducirá al estado de esqueleto. Los primeros en intervenir, los dípteros necrófagos, localizan el cuerpo gracias a los quimiorreceptores de sus antenas. Omnipresentes en la naturaleza y dotados de un sistema de locomoción eficaz (el vuelo), los adultos llegan con rapidez a los despojos. Las hembras ponen huevos en los orificios naturales, los ojos, las heridas e incluso en los pliegues cutáneos. Tras la incubación, una larva joven (el primer estadio del desarrollo) sale del huevo, muda dos veces y después abandona el cadáver para enterrarse en el suelo; si el fallecido se encuentra en el interior de una casa, la larva se refugia bajo elementos diversos (una alfombra, una cama, un mueble) o en la periferia de la habitación. A resguardo de los depredadores y de la luz, prepara su metamorfosis formando una envuelta glucoproteica rígida, el pupario, en cuyo interior se transforma lentamente. El insecto adulto, o imago, saldrá del

pupario y emprenderá el vuelo para iniciar un nuevo ciclo de desarrollo. El pupario abandonado constituye un indicador temporal: su presencia en el suelo revela que la especie en cuestión ha cumplido un ciclo completo de desarrollo y, por tanto, las larvas presentes en el cadáver no han surgido de las primeras puestas, una información esencial para la datación.

Si los necrófagos estrictos, que se alimentan exclusivamente de cadáveres, suelen ser los primeros en intervenir, hay insectos de otros grupos que los siguen de cerca: depredadores, parásitos, omnívoros u oportunistas hallan su lugar en este ecosistema singular. Una gran variedad de ellos, pero también otros artrópodos (arañas, ácaros y otros) participan de este modo en la descomposición de la materia orgánica. En 1894, el veterinario y entomólogo Pierre Mégnin (1828-1905) describió una sucesión de ocho oleadas de insectos y ácaros, condicionada por el estado de degradación del cadáver, y calificó a estos animales de «trabajadores de la muerte».

Más tarde, diversos estudios confirmaron la sucesión de varias familias de dípteros y otros artrópodos, aunque se observaron algunas diferencias en el número y tipo de especies. Uno de tales estudios ha supuesto doce años de dedicación por parte del departamento de entomología del Instituto de Investigación Criminal de la Gendarmería Nacional de Francia (IRCGN).

Al igual que la descomposición, la colonización de un cadáver por la entomofauna necrófaga depende de numerosos factores; en particular, de las condiciones de la muerte, de la accesibilidad del cadáver (si se halla enterrado, los primeros en intervenir son pequeños dípteros que llegan a él a través de las anfractuosidades del suelo, no las grandes moscas califóridas y sarcofágidas), de las condiciones climáticas, etcétera. En determinados casos, este principio de sucesión puede utilizarse para la estimación de períodos post mórtem largos, de varias semanas e incluso de algunos meses.

MODO DE PROCEDER

En el marco de la entomología legal, la recolección de insectos se efectúa en dos lugares: en la escena del crimen, por supuesto, pero también en el transcurso de la autopsia, cuando pueden emerger del cadáver nuevos insectos y las condiciones resultan más favorables para el examen (el cadáver se halla sobre una mesa y se dispone de una iluminación adecuada). La recolección es cualitativa, no cuantitativa. No se trata de inventariar la totalidad de la fauna entomológica que hay en el cuerpo, sino de localizar las especies de interés forense. Se utilizan casi exclusivamente los dípteros, cuyos ciclos de desarrollo son bien conocidos y bastante cortos, del orden de algunas semanas (los coleópteros, en cambio, se desarrollan a lo largo de varios meses, incluso años, lo que dificulta la datación a escala de días).

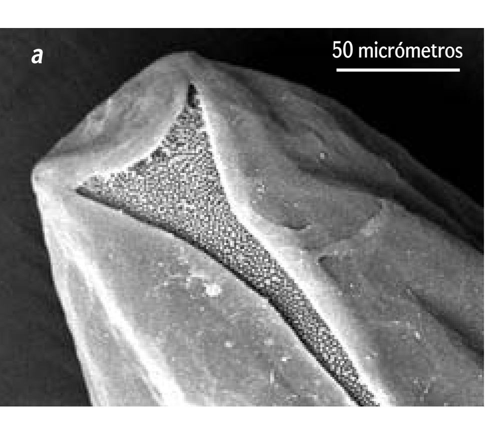
Las recolecciones siguen una metodología rigurosa. Los insectos se introducen en contenedores precintados, como cualquier otra prueba que se descubra en el lugar del crimen, y se mantienen vivos hasta su llegada al laboratorio.







LA ENTOMOLOGÍA LEGAL sigue procedimientos rigurosos. Los técnicos especializados recolectan las larvas de los insectos del cadáver. Estas se acondicionan y se colocan en contenedores precintados antes de ser enviadas al laboratorio (*a*). Allí, se determina la especie mediante la observación de su morfología bajo un estereomicroscopio (o lupa binocular de gran aumento), directamente o después de haber dejado que los individuos inmaduros se desarrollen (*b*). En caso de dificultad, los especímenes se comparan con una colección de referencia (*c*), a fin de confirmar la especie.







LAS MOSCAS PONEN SUS HUEVOS sobre los cadáveres (*a*, extremo de un huevo visto al microscopio electrónico de barrido), donde las larvas proliferan con rapidez (*b*, una larva mide entre uno y una veintena de milímetros de longitud). Están dotadas de ganchos bucales retráctiles (*c, en negro*), con los que se alimentan y se desplazan.

THIERRY DODIER (*a*), EMMANUEL GAUDRY (*b y c*), INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN CRIMINAL DE LA GENDARMERÍA NACIONAL

A continuación, los dípteros inmaduros se colocan en condiciones de cría hasta la aparición de los adultos, en recintos donde se controlan los parámetros climáticos. La identificación de las especies mediante la observación de caracteres morfológicos, que suele realizarse con los adultos porque las larvas de especies diferentes se asemejan mucho entre sí, revela su alimentación y su hábitat más común. Sobre todo, informa acerca de la biología de la especie, es decir, de las actividades de vuelo y puesta, así como del desarrollo de los inmaduros en función de las condiciones ambientales.

Así, el estudio de la fisiología del desarrollo constituye uno de los pilares de la entomología legal. Permite estimar la fecha de la puesta de los primeros insectos que colonizaron el cadáver, a partir del grado de madurez de su progenie. Ha de tenerse también en cuenta la influencia de los factores externos (hábitat, competencia alimentaria, duración del día, humedad, pluviometría, viento).

IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA

Este parámetro ejerce una enorme influencia en la cinética del desarrollo de las larvas y en la actividad de los adultos, porque los insectos son poiquilotermos, esto es, carecen de sistema de termorregulación. El estadio adulto puede representarse por una constante C, propia de cada especie, que corresponde al producto de una temperatura por un tiempo y, por tanto, a una acumulación de energía térmica; es la *acumulación grados-día*. Se aplica la siguiente fórmula: $d = C/(t - x)$, en la que d es el número de días necesarios para alcanzar el estado adulto, t la temperatura y x el umbral térmico mínimo, es decir, la temperatura por debajo de la cual las larvas no se desarrollan. Cuanto más cerca se halle la temperatura del umbral térmico mínimo, más lentamente se desarrolla la larva. A título de ejemplo, si una especie tiene una constante térmica de 400 grados-día, un umbral térmico de 3 grados y los huevos de dicha especie se encuentran a 25 grados, el tiempo de desarrollo (d) vale $400/(25 - 3) = 18{,}2$ días. Hay numerosos trabajos en curso sobre este tema, lo que refuerza las bases de datos de los entomólogos forenses.

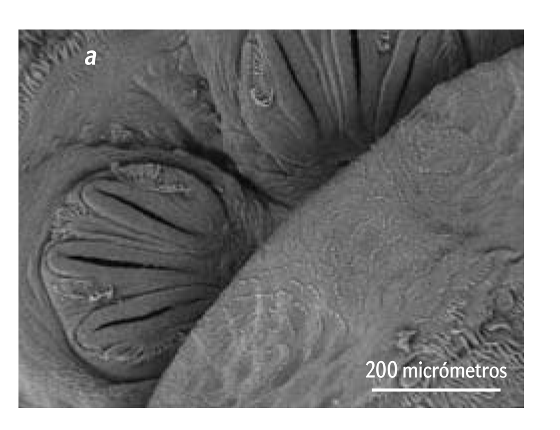
El hecho de tomar en cuenta con precisión las temperaturas hizo reorientar la investigación de un caso reciente. En pleno invierno, al borde de un barranco, se descubrió un cadáver cuyo buen estado de conservación hacía suponer que la muerte había tenido lugar, todo lo más, ocho días antes. Del cadáver se obtuvieron larvas de califóridos; su estado juvenil apuntaba también a una muerte reciente. Sin embargo, gracias a los datos climáticos de la zona donde se descubrió el cuerpo, un analista pudo estimar la fecha de las primeras puestas: estas se remontaban a cuatro semanas. Las bajas temperaturas registradas en aquel lugar habían retardado el desarrollo de las larvas, sin detenerlo. El conocimiento de la biología de dichos insectos, a los que el frío afecta mucho, resultó, pues, fundamental. La instrucción confirmó que la víctima había sido apuñalada un mes antes, con anterioridad al abandono del cadáver en el barranco.

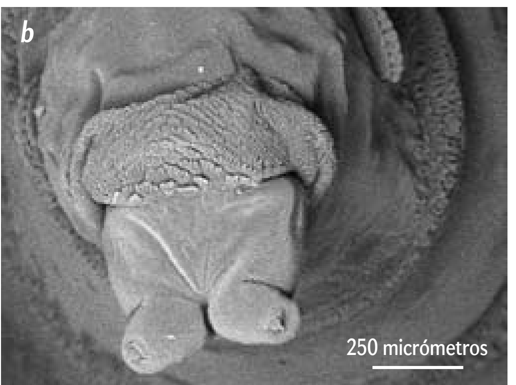
Si bien los datos climáticos revisten suma importancia a la hora de estimar el momento del fallecimiento, la obtención de valores característicos del lugar en el que se ha descubierto un cadáver entraña cierta dificultad. La red de estaciones meteorológicas distribuidas sobre el conjunto del territorio nacional da acceso a un gran número de valores, pero la estación más cercana no es necesariamente la más representativa. Ello se debe a diferencias de insolación, de altitud, entre otras razones. Existen modelos que permiten elegir la mejor estación y aplicar factores correctores a los valores que proporciona, aunque se debate sobre su pertinencia.

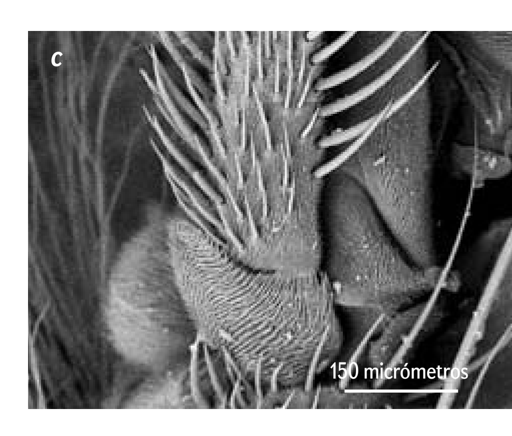
LEER LA ESPECIE EN EL ADN

En determinados casos, los insectos necrófagos llegan al laboratorio muertos y estropeados debido a unas malas condiciones de transporte, por lo que la observación de su morfología a la lupa binocular de gran aumento no permite identificar la especie; en el mejor de los casos puede reconocerse el género. En tales situaciones se recurre a la biología molecular: se extraen y secuencian fragmentos de ADN, que después se comparan con secuencias de referencia. Desde hace algunos años se ha generalizado el uso de un gen mitocondrial, el *COI* (de la citocromo oxidasa de tipo I), pues presenta una secuencia casi idéntica en todos los ejemplares de una misma especie; la técnica de identificación de especies a partir de dicho gen se denomina codificación en barras (*barcoding*) [*véase* «El código de barras de la vida», por M. Y. Stoeckle y P. D. N. Hebert; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. El gen *COI* constituye un buen marcador, pero a veces resulta insuficiente para distinguir especies genéticamente cercanas. Además, se han detectado diferencias intraespecíficas entre individuos de orígenes geográficos distintos.

La biología molecular no solo sirve para determinar las especies de insectos; de hecho, se ha extraído ADN humano del aparato digestivo de larvas que se habían desarrollado sobre un cadáver. Al analizar las larvas presentes en un lugar concreto, debería poder establecerse si estas «consumieron» un







LA MOSCA *PROTOPHORMIA TERRAENOVAE,* de la familia Califóridos, forma parte de la primera oleada de insectos que colonizan un cadáver. Aquí se la ve bajo el microscopio electrónico, en un estadio larvario (en *a*, unos orificios respiratorios; en *b*, una imagen de la cabeza) y en la edad adulta (en *c*, la base del ala).

MAGALI NOEL, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN CRIMINAL DE LA GENDARMERÍA NACIONAL

fragmento del cuerpo sobre el que se hace la instrucción, lo que permitiría deducir si dicho cadáver ha estado temporalmente en ese lugar.

El estudio de los insectos puede también informar sobre las causas de la muerte. Si la persona ha absorbido drogas, medicamentos o veneno, ciertas larvas que devoran el cadáver los ingerirán de forma indirecta y los fijarán en sus tejidos. Se podría establecer entonces si la muerte sobrevino por una sobredosis o un envenenamiento; tal es el campo de la entomotoxicología. No obstante, carecemos todavía de los conocimientos suficientes sobre el modo en que el organismo de los invertebrados trata dichas sustancias y sobre las consecuencias fisiológicas de su absorción, por lo que no siempre puede deducirse la cantidad ingerida.

OTRAS APLICACIONES

La entomología legal ha demostrado su eficacia a la hora de estimar el momento de la muerte. Esta es la aplicación esencial de la disciplina; pero no solo se limita a ese aspecto. Interviene también cuando el estudio de un insecto o de un artrópodo puede proporcionar información en el marco de una instrucción judicial. Las aplicaciones se están desarrollando en correspondencia con las solicitudes que los expertos reciben. Ejemplos de ello constituyen la estimación de la fecha de contaminación con insectos de ciertos productos o la lucha contra el tráfico de especies protegidas (la identificación de insectos decomisados en las fronteras revela si pertenecen a una especie protegida que es objeto de un comercio lucrativo). Incluso se ha efectuado un análisis entomológico en relación con un accidente de avión, provocado por nidos de insectos que obturaban los conductos conectados a instrumentos de medición; al determinar la duración de la presencia de los invertebrados, los expertos indicaron desde cuándo podía haber existido un mantenimiento deficiente.

Cabe mencionar, asimismo, el caso de dos estafadores que vendían un supuesto insecticida contra los termes. Se presentaban en el domicilio de sus víctimas para inspeccionar las vigas, tras lo cual informaban haber hallado en ellas insectos que describían como termes. Por último, ofrecían, a un precio elevado, su producto milagroso a los habitantes. Estos, atenazados por las dudas, contactaron con la gendarmería, que envió al departamento de entomología del IRCGN los ejemplares «olvidados» por los estafadores. Tales insectos no eran termes, sino tenebriónidos, o gusanos de la harina, que no consumen madera. La superchería era manifiesta y los culpables fueron arrestados.

Los últimos años la entomología legal y, de manera más general, las ciencias criminales se han profesionalizado. Numerosos laboratorios han accedido a las exigencias de la garantía de calidad, y muchos de ellos han obtenido una acreditación (reconocimiento de una competencia técnica, en virtud de normas europeas, concedida por un organismo exterior), un indicio de que han armonizado los protocolos y han minimizado las causas de error. Fruto del consenso entre revisores científicos externos, este trabajo se ha efectuado con la preocupación por la transparencia hacia el requirente (magistrado o instructor).

No obstante, hemos de mejorar nuestros conocimientos en numerosos puntos. Las variaciones según las especies del impacto de los parámetros ambientales, como la temperatura, sobre la fisiología del desarrollo, ofrecen un ejemplo de ello. También hay que profundizar en la ecología del cadáver: las asociaciones de especies, las relaciones intraespecíficas (competencia) o interespecíficas (competencia, depredación, parasitismo) pueden influir de manera notable en el desarrollo de los artrópodos. Por último, falta estudiar en detalle ciertas colonizaciones, como la de cadáveres enterrados en profundidad o sumergidos, sobre los que crecen invertebrados que podrían constituir indicadores temporales. Si bien la entomología legal ha desarrollado un verdadero arsenal científico al integrar la biología molecular y utilizar métodos estadísticos y técnicas experimentales perfeccionadas, los especialistas tienen todavía numerosos secretos por descubrir.

PARA SABER MÁS

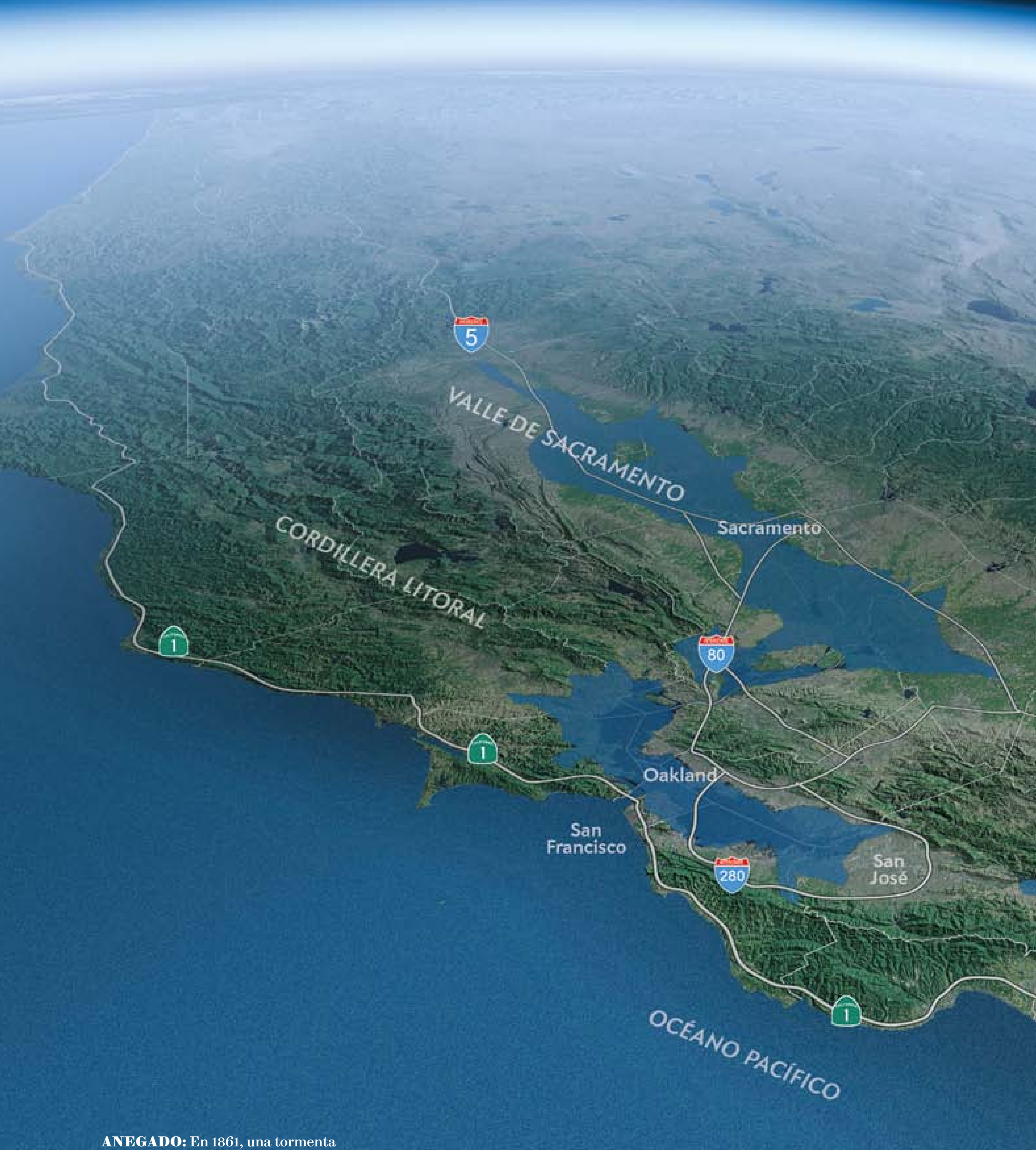
Entomologie et médécine légale. Datation de la mort. M. Leclercq. Masson, París, 1978.

Los muestreos entomológicos: De la escena del crimen a la peritación. T. Pasquerault, B. Vincent, L. Dourel, B. Chauvet y E. Gaudry en *Ciencia forense*. Revista aragonesa de medicina legal, n.º 8, págs. 39-55. Monográfico: Entomología forense, 2006.

L'entomologie légale: Une identification ciblée pour une réponse adaptée. E. Gaudry et al. en *Mémoires de la Société entomologique de France*, vol. 8, págs. 85-92, 2009.

Forensic entomology: A new hypothesis for the chronological succession pattern of necrophagous insects on human corpses. F. Lefebvre y E. Gaudry en *Annales de la Société entomologique de France*, vol. 45, págs. 377-392, 2009.

The insect's colonization on buried remains. E. Gaudry en *Current Concepts in Forensic Entomology*, dirigido por J. Amendt et al. págs. 273-312. Springer, 2010.



ANEGADO: En 1861, una tormenta de 43 días desatada por un río atmosférico convirtió el Valle Central californiano en un mar interior, recreado aquí sobre un mapa actual.

DON FOLEY

METEOROLOGÍA

LAS PRÓXIMAS MEGAINUNDACIONES

Enormes corrientes de vapor en la atmósfera, conocidas como ríos atmosféricos, han desencadenado inundaciones extremas cada 200 años. El cambio climático podría incrementar su frecuencia

Michael D. Dettinger y B. Lynn Ingram





Michael D. Dettinger es hidrogeólogo del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. e investigador de la División sobre el Clima, Ciencias Atmosféricas y Oceanografía Física del Instituto Scripps de Oceanografía en La Jolla, California.



B. Lynn Ingram es profesora de ciencias geológicas y planetarias en la Universidad de California en Berkeley. Es coautora del libro *The West without water* (University of California Press, primavera de 2013).

En la Nochebuena de 1861, unas intensas tormentas procedentes del océano Pacífico comenzaron a azotar el centro de California y persistieron casi sin descanso durante 43 días. Pronto el diluvio transformó los ríos de la vertiente este de Sierra Nevada en furiosos torrentes que arrasaron comunidades enteras y poblaciones mineras. Las aguas de ríos y lluvias convirtieron el vasto Valle Central californiano en un mar interior de unos 500 kilómetros de longitud y 30 kilómetros de anchura. Millares de personas perdieron la vida y una cuarta parte de las 800.000 cabezas de ganado del estado murieron ahogadas. El centro de la ciudad de Sacramento quedó anegado bajo tres metros de aguas marrones cargadas de derrubios procedentes de los innumerables deslizamientos que se habían producido en las pronunciadas laderas de la región. El Gobierno de California, paralizado, se trasladó a San Francisco hasta que Sacramento consiguió secarse, seis meses más tarde. Para entonces, el estado se había declarado en bancarrota.

Si hoy se produjera un evento similar, las consecuencias resultarían mucho más devastadoras. En el Valle Central residen más de seis millones de personas, de las que 1,4 millones viven en Sacramento. La tierra genera allí unos 20.000 millones de dólares al año en cosechas, con un 70 por ciento de la producción mundial de almendras; algunas áreas han experimentado una subsidencia de 9 metros como consecuencia del bombeo indiscriminado de agua subterránea, lo que las hace más vulnerables a las inundaciones. Una investigación reciente que ha simulado por ordenador una tormenta de intensidad análoga y de tan solo 23 días de duración ha concluido que el evento acarrearía unos daños materiales y unas pérdidas agrícolas que alcanzarían los 400.000 millones de dólares. Miles de personas fallecerían a menos que las medidas de preparación y los planes de evacuación funcionaran de forma efectiva.

¿Constituyó la inundación de 1861-62 un suceso extraordinario? En apariencia, no. El estudio de los depósitos sedimentarios en diversas ubicaciones demuestra que los episodios de tales dimensiones han anegado California con una recurrencia de dos siglos, al menos durante los dos últimos milenios. Las tormentas de 1861-62 también afectaron al intervalo de costa que abarca desde el norte de México y el sur de California hasta Columbia Británica, donde desencadenaron las peores inundaciones que se han registrado hasta la fecha. En la actualidad, los climatólogos postulan que aquellos eventos, así como otros similares que han tenido lugar en diversas regiones del planeta, fueron consecuencia de los ríos atmosféricos, un fenómeno del que pocos lectores habrán oído hablar. Y estiman que a California, al menos, le está llegando el turno de nuevo.

DIEZ RÍOS MISSISSIPPI EN LA ATMÓSFERA

Los ríos atmosféricos consisten en largas corrientes de vapor de agua que se originan a unos 1,6 kilómetros de altura en la atmósfera. Miden tan solo 400 kilómetros de ancho, pero recorren miles de kilómetros de distancia; en ocasiones cruzan toda una cuenca oceánica, como el Pacífico. Semejantes cintas transportadoras de vapor llevan una cantidad de agua equivalente a entre 10 y 15 ríos Mississippi desde los trópicos hasta las latitudes medias. Cuando un río atmosférico alcanza la costa oeste de Estados Unidos y colisiona contra las cadenas

EN SÍNTESIS

Los registros geológicos demuestran que cada 200 años se han producido en California inundaciones extremas, causadas únicamente por lluvias. La última aconteció en 1861 y dejó el estado en bancarrota.

Todo apunta a que aquellos episodios respondieron a la acción de ríos atmosféricos, unas estrechas bandas de vapor de agua situadas a 1,6 kilómetros de la superficie oceánica que recorren miles de kilómetros. Esos ríos, en una forma mucho más atenuada, alcanzan con regularidad el estado de California y las costas occidentales de otros países.

Un grupo de científicos que ha realizado la simulación de una megatormenta en la California actual, semejante a la de 1861 pero menos duradera, estima que el episodio podría suponer la evacuación de más de un millón de personas y unas pérdidas económicas de 400.000 millones de dólares.

Los expertos están mejorando la capacidad de predecir la llegada de ríos atmosféricos, lo que permitirá alertar sobre inundaciones causadas por tormentas normales y posibles catástrofes desatadas por una megatormenta.

montañosas interiores, como Sierra Nevada, se ve obligado a ascender y, al enfriarse, se condensa y da lugar a ingentes cantidades de lluvia.

Los habitantes de la costa oeste de América del Norte llevan mucho tiempo familiarizados con las tormentas llamadas *pineapple express*, que proceden de latitudes tropicales, cerca de Hawái, y descargan intensas lluvias y nevadas durante un período de tres a cinco días. Se piensa que tales episodios corresponden a un tipo de río atmosférico. De acuerdo con las últimas investigaciones, nueve ríos de vapor azotan cada año el estado de California. Entre ellos, solo unos pocos alcanzan la magnitud suficiente para causar verdaderas megainundaciones. Con todo, la intensidad de las tormentas «normales» es equiparable a la de las lluvias torrenciales que se producen en el resto del país, por lo que suponen igualmente un desafío para las brigadas de emergencia, los servicios de previsión de inundaciones y los departamentos de gestión hidrológica.

Los ríos atmosféricos causan también lluvias en las costas occidentales de otros continentes y, en ocasiones, pueden desarrollarse en lugares poco habituales. Así, la inundación catastrófica que azotó Nashville y sus alrededores en mayo de 2010 —que causó la muerte a 30 personas y más de 2000 millones de dólares en daños— fue nutrida por un río atmosférico extraordinario, procedente del golfo de México, que causó intensas lluvias ininterrumpidas durante dos días en Tennessee. En 2009, se produjeron inundaciones masivas en el sur de Inglaterra y algunas regiones de España como consecuencia de los ríos atmosféricos. Sin embargo, conocemos mejor la dinámica del fenómeno a lo largo de la costa pacífica. Por otro lado, los estudios más recientes revelan que los ríos de vapor podrían magnificarse en un futuro a medida que el clima se calienta.

UN DESCUBRIMIENTO INESPERADO

A pesar de su enorme poder de destrucción, los ríos atmosféricos no se descubrieron hasta hace poco y, en parte, por casualidad.

En enero de 1998, el Laboratorio de Tecnología Ambiental de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano estadounidense (NOAA) inició un proyecto denominado CALJET con el objetivo de mejorar la predicción de tormentas intensas en la costa californiana. El meteorólogo del laboratorio Marty Ralph y otros científicos sobrevolaron el Pacífico Norte a bordo de un avión especialmente equipado y se adentraron en una tormenta invernal para determinar sus condiciones internas. La tormenta fue descrita como un «chorro», una zona de fuertes vientos. Los investigadores calcularon que aquel único evento, que perseveró durante días, transportaba el 20 por ciento de toda la humedad atmosférica transferida desde las latitudes medias hacia el Polo Norte. El chorro se concentraba a unos 1,6 kilómetros de la superficie oceánica, una altura excesiva para localizarlo mediante las observaciones meteorológicas tradicionales realizadas desde la superficie terrestre.

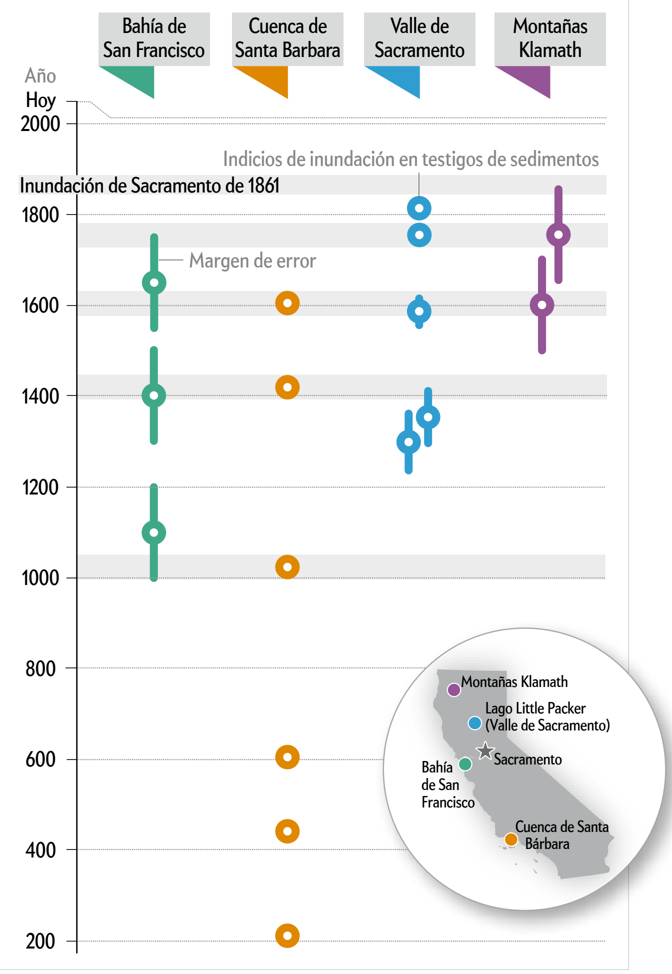
También en 1998, los investigadores Yong Zhu y el fallecido Geinald Newell, por entonces en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, repararon en una peculiaridad que aparecía en unas simulaciones de la circulación global del viento y el vapor de agua realizadas por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo. Hallaron que, fuera de los trópicos, un 95 por ciento del transporte total de vapor hacia los polos tenía lugar en cinco o seis bandas estrechas; distribuidas más o menos aleatoriamente por el planeta, se desplazaban de oeste a este a través de las latitudes medias. El término «ríos atmosféricos» se acuñó para describir dichas bandas.

CRONOLOGÍA

Megainundaciones en California cada 200 años

California ha sido azotada por inundaciones masivas cada 200 años aproximadamente, según indican los análisis de los sedimentos depositados por los torrentes en cuatro ubicaciones muy distantes entre sí. Las diferentes técnicas de datación aplicadas a los depósitos presentan distintos márgenes de error, pero los valores medios concuerdan bastante. Si se cumple la recurrencia, el estado podría estar a punto de sufrir una nueva catástrofe; la última megainundación tuvo lugar en 1861 y anegó la ciudad de Sacramento durante seis meses (*fotografía*).





COLECCIÓN DAVID JOSLYN/CENTRO DE HISTORIA DE SACRAMENTO; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*), XNR PRODUCTIONS (*mapa*)

Casi al mismo tiempo, los satélites dotados del nuevo sensor especial de imágenes por microondas permitían por primera vez obtener una visión clara y completa de la distribución mundial del vapor de agua. Las imágenes reflejaban que este tendía a concentrarse en largos y estrechos corredores que se extendían desde el aire cálido y húmedo de los trópicos hasta las regiones más secas y frías alejadas de las latitudes tropicales. Los tentáculos aparecían y se desvanecían en intervalos de tiempo que abarcaban entre unos días y un par de semanas.

Como cabía esperar, no se tardó en poner en conjunto aquellos tres descubrimientos que se complementaban de una forma tan llamativa. Desde entonces, se ha llevado a cabo un número creciente de investigaciones con el objetivo de caracterizar con detalle los ríos atmosféricos de la costa oeste estadounidense. A fin de monitorizarlos, se han construido nuevos observatorios dotados de radares ascendentes y perfiladores de vientos. El programa del Banco de Pruebas de Hidrometeorología de la NOAA se ocupa de observar la región continental para dilucidar lo que ocurre cuando un río atmosférico se adentra en ella.

A partir de los datos recogidos por dichos sistemas de observación, los expertos han mejorado su capacidad para reconocer ríos atmosféricos en las simulaciones meteorológicas y pronosticar su llegada a la costa occidental. En los últimos años se han podido identificar algunas tormentas con más de una semana de antelación. También se está descubriendo la presencia de ríos atmosféricos en los modelos utilizados para prver cambios climáticos futuros. Los meteorólogos, que cuentan ahora con mayores habilidades predictivas, están comenzando a alertar a la población de lluvias extremadamente intensas con mucha más antelación. Dicha mejora permite a los gestores de emergencias disponer de más tiempo para prepararse [*véase* «Huracán a la vista», por J. Lubchenco y J. L. Hayes; Investigación y Ciencia, julio de 2012].

¿UNA MEGAINUNDACIÓN CADA SIGLO?

A pesar de que hoy poseemos un mayor conocimiento científico, las inundaciones de 1861-62 han caído en el olvido. A lo largo del siglo pasado, las comunidades, la industria y las operaciones agrícolas en California y el oeste de Estados Unidos se han expandido sobre las mismas llanuras que quedaron sumergidas hace 150 años. Los habitantes de la región se muestran confiados y no son conscientes del evidente riesgo al que se encuentran sometidas sus vidas y propiedades. Mientras tanto, entre los climatólogos reina el desasosiego y la preocupación ante la acumulación de datos que apuntan hacia una nueva megatormenta que podría acontecer en un futuro próximo.

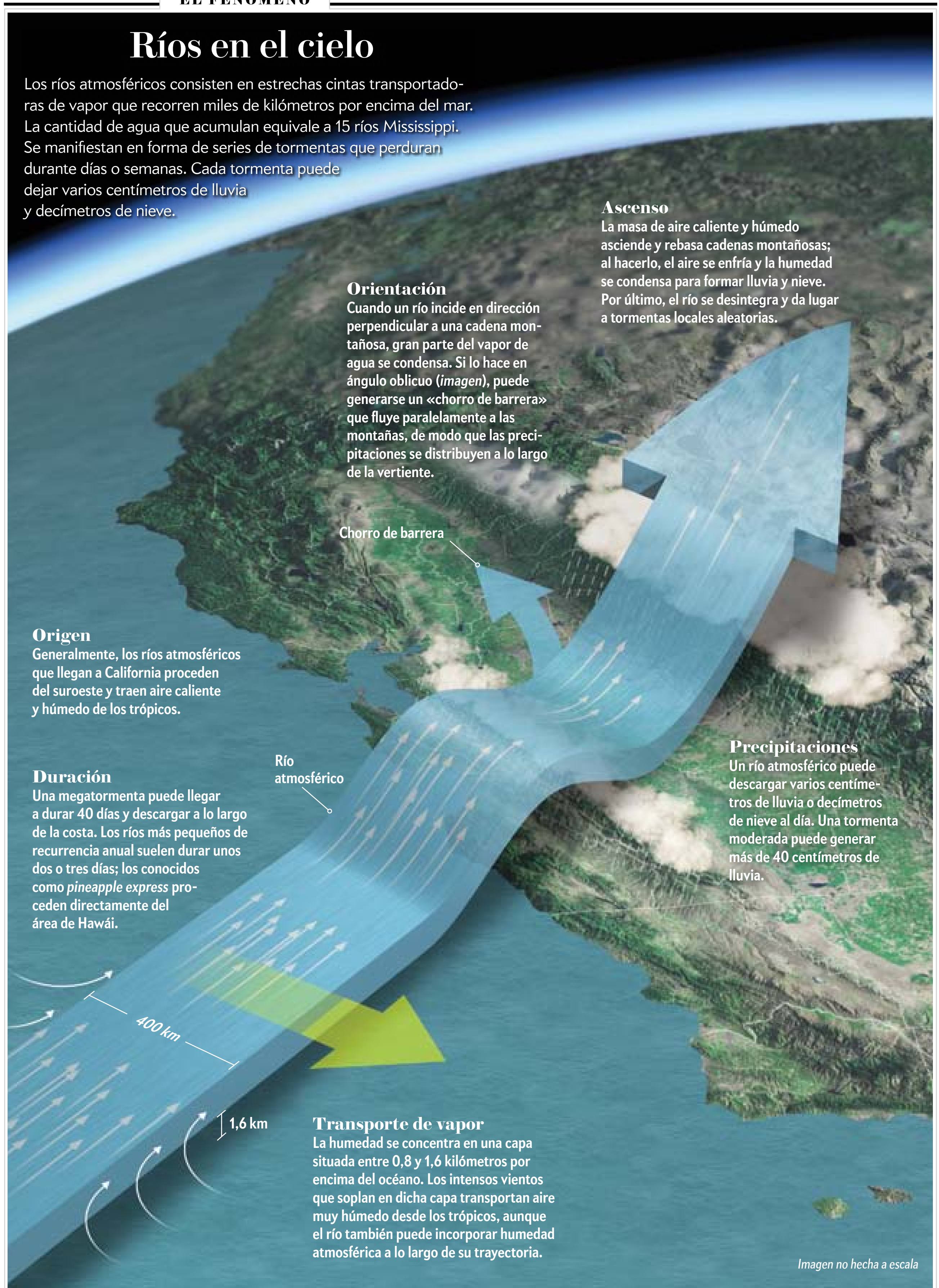
Dicha inquietud surge de una investigación que intenta recopilar indicios que revelen la ocurrencia y la frecuencia de inundaciones en los últimos 2000 años. Se trata de un trabajo detectivesco que consiste en recomponer unos hechos que tuvieron lugar hace mucho tiempo. Los científicos identifican las pruebas que han quedado atrapadas en lechos lacustres, llanuras de inundación, marismas y cuencas submarinas. Las aguas descienden por las laderas y surcan el terreno y, al hacerlo, erosionan las colinas, movilizan arcilla, limo y arena y transportan todo ese material en grandes riadas. Cuando los ríos alcanzan una llanura, marisma, estuario o el océano, sus aguas pierden velocidad y se deposita su carga de sedimentos: primero lo hace la grava gruesa, a continuación la arena y finalmente los limos y las arcillas. La naturaleza remodela tales depósitos y con el tiempo quedan enterrados bajo nuevos sedimentos que se forman en condiciones meteorológicas normales. Los expertos extraen testigos verticales de dichos sedimentos y, una vez en el laboratorio, analizan los estratos preservados y datan los acontecimientos que se produjeron en cada momento.

De ese modo, se han encontrado depósitos de inundación bajo marismas intermareales en las proximidades de la bahía de San Francisco, en el norte de California. Las aguas fluviales que llegan a las marismas suelen descargar solo una parte muy reducida de los materiales más finos, es decir, arcillas y limos. Las corrientes más vigorosas, durante episodios de inundación intensos, transportan partículas de mayor tamaño y dan lugar a capas de sedimento de mayor espesor y grano más grueso. Los estratos correspondientes a una inundación pueden datarse mediante radiocarbono, una técnica corriente que en esta aplicación ofrece una precisión de unos 100 años. Un estudio de los testigos de marismas realizado por uno de los autores (Ingram) y la geógrafa Frances Malamud-Roam reveló depósitos de inundaciones masivas correspondientes, aproximadamente, a los años 1100, 1400 y 1650. Sin embargo, no es fácil localizar un estrato distintivo que se correlacione con el evento de 1861-62. Durante las décadas anterior y posterior a la inundación, la explotación hidráulica del oro en las faldas de Sierra Nevada movilizó un enorme volumen de limo y arcilla, lo que prácticamente borró cualquier huella que los torrentes hubieran podido dejar.

Los testigos de sedimentos recuperados del fondo de la propia bahía de San Francisco también indican que hacia 1400 la bahía se rellenó de agua dulce (como ocurrió durante el evento de 1861-62), una prueba más de que se produjo una inundación masiva.

Los geólogos han hallado otros indicios en el sur de California. En esta área, a lo largo de la costa de Santa Bárbara, residen dos tercios de los casi 38 millones de habitantes del estado. Cada primavera se deposita en el fondo oceánico de la región una capa de sedimentos de color claro constituida por algas diatomeas, mientras que en invierno se forma una capa oscura de limo. Debido a la deficiencia de oxígeno en las aguas profundas, las condiciones resultan inhóspitas para los organismos bentónicos que remueven y excavan el suelo, por lo que las capas anuales de sedimentos se han preservado de forma excepcional a lo largo de miles de años. Los testigos obtenidos del fondo revelan la ocurrencia de seis megainundaciones. En ellos se distinguen estratos gruesos de limo gris cuya datación corresponde a los años 212, 440, 603, 1029, 1418 y 1605. Los tres últimos años se correlacionan bien con los deducidos a partir de los depósitos de marisma cerca de la bahía de San Francisco (1100, 1400 y 1650), lo que confirma que han tenido lugar inundaciones generalizadas cada pocos siglos. (En octubre, Ingrid Hendy, de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores publicaron un artículo basado en un método distinto de datación; en él se presenta un conjunto de datos relativos a la zona de Santa Bárbara que se desvían de 100 a 300 años de las seis fechas específicas, pero aun así sigue manteniéndose la frecuencia básica de una megainundación cada 200 años.)

Los depósitos de mayor espesor en la cuenca de Santa Bárbara se formaron en 1605 y alcanzan unos 5 centímetros a unos pocos kilómetros de la costa. Las inundaciones de 440 y 1418 dieron lugar a estratos de más de 2,5 centímetros. La diferencia es notable respecto a las capas de 0,6 y 0,2 centímetros que aparecen en la parte superior del mismo testigo y que se correlacionan con las tormentas de 1958 y 1964, respectivamente, consideradas entre las más violentas del siglo pasado. Las tres inundaciones anteriores debieron de resultar mucho más devastadoras que cualquier otra presenciada por el hombre.



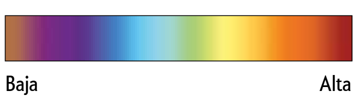
Ríos en el cielo
Los ríos atmosféricos consisten en estrechas cintas transportadoras de vapor que recorren miles de kilómetros por encima del mar. La cantidad de agua que acumulan equivale a 15 ríos Mississippi. Se manifiestan en forma de series de tormentas que perduran durante días o semanas. Cada tormenta puede dejar varios centímetros de lluvia y decímetros de nieve.
Ascenso
La masa de aire caliente y húmedo asciende y rebasa cadenas montañosas; al hacerlo, el aire se enfría y la humedad se condensa para formar lluvia y nieve. Por último, el río se desintegra y da lugar a tormentas locales aleatorias.
Orientación
Cuando un río incide en dirección perpendicular a una cadena montañosa, gran parte del vapor de agua se condensa. Si lo hace en ángulo oblicuo (imagen), puede generarse un «chorro de barrera» que fluye paralelamente a las montañas, de modo que las precipitaciones se distribuyen a lo largo de la vertiente.
Chorro de barrera
Origen
Generalmente, los ríos atmosféricos que llegan a California proceden del suroeste y traen aire caliente y húmedo de los trópicos.
Duración
Una megatormenta puede llegar a durar 40 días y descargar a lo largo de la costa. Los ríos más pequeños de recurrencia anual suelen durar unos dos o tres días; los conocidos como pineapple express proceden directamente del área de Hawái.
Río atmosférico
Precipitaciones
Un río atmosférico puede descargar varios centímetros de lluvia o decímetros de nieve al día. Una tormenta moderada puede generar más de 40 centímetros de lluvia.
400 km
1,6 km
Transporte de vapor
La humedad se concentra en una capa situada entre 0,8 y 1,6 kilómetros por encima del océano. Los intensos vientos que soplan en dicha capa transportan aire muy húmedo desde los trópicos, aunque el río también puede incorporar humedad atmosférica a lo largo de su trayectoria.
Imagen no hecha a escala

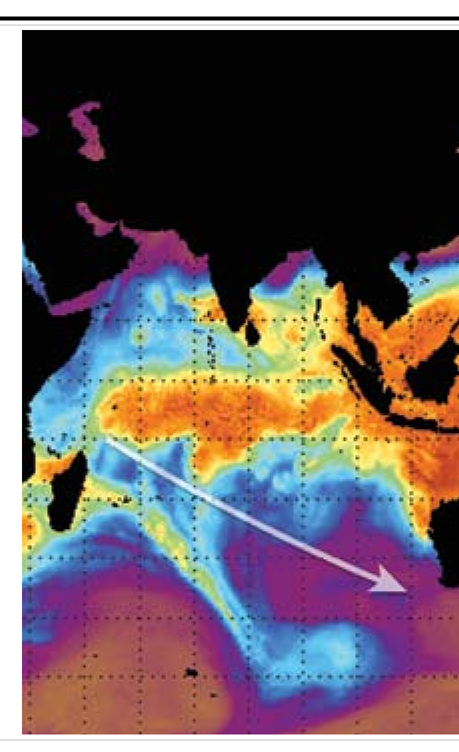
ALERTA GLOBAL

En todas las costas occidentales

Los ríos atmosféricos se forman sobre las aguas tropicales y fluyen hacia los polos en dirección a las costas occidentales de numerosos continentes (un río azotó Inglaterra en 2009). Los más prominentes se localizan a lo largo de la costa pacífica de EE.UU., pero en ocasiones pueden situarse en lugares inusuales, como el golfo de México (uno de ellos inundó Nashville en mayo de 2010). El número de ríos de vapor podría aumentar en el futuro a medida que el clima se calienta.







CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON/SSEC (*mapa base de humedad atmosférica*); XRN PRODUCTIONS (*flechas y capa de masas continentales*)

También se han hallado indicios de inundaciones masivas a unos 240 kilómetros al noreste de la bahía de San Francisco en testigos recuperados de Little Packer, un pequeño lago situado en la llanura de inundación del río Sacramento, el más largo del norte de California. Durante un episodio de gran magnitud, los torrentes cargados de sedimentos se vierten en el lago y los materiales se depositan en el fondo y forman espesas capas de grano grueso. El geógrafo Roger Byrne, de la Universidad de California en Berkeley, y su entonces doctorando Donald G. Sullivan utilizaron el método del radiocarbono para determinar que se había producido una inundación equiparable a la de 1861-62 en los siguientes intervalos de tiempo: 1235-1360, 1295-1410, 1555-1615, 1750-70 y 1810-20. Es decir, una cada 100 o 200 años.

Algunas megainundaciones también nos legaron un registro de su paso por los angostos cañones de las montañas Klamath, en el extremo noroeste de California. Dos depósitos de particular espesor se formaron hacia 1600 y 1750, unas fechas que de nuevo concuerdan con los datos anteriores.

Al contrastar el conjunto de pruebas, se observa que el episodio de 1605 fue al menos un 50 por ciento más intenso que el resto. Y a pesar de la imprecisión de la datación por radiocarbono, cuyos resultados podrían reinterpretarse si mejoraran los métodos, el inquietante balance final es que cada dos siglos, más o menos, acontecen megainundaciones tanto o más intensas que la de 1861-62. Han pasado 150 años desde la calamidad y, por tanto, California podría ser pronto víctima de un nuevo evento.

AUMENTA LA PROBABILIDAD DE CATÁSTROFES

Irónicamente, los ríos atmosféricos que fluyen por encima de California no solo tienen repercusiones negativas. Los de tamaño más reducido que se forman anualmente suponen una valiosa fuente de agua. El análisis de la cantidad de lluvia y nieve que han transportado los ríos atmosféricos hasta la costa oeste de Estados Unidos en las últimas décadas, así como los datos registrados a largo plazo de lluvia, nieve y flujo de escorrentía, indican que, entre 1950 y 2010, estos fenómenos aportaron del 30 al 50 por ciento del agua total de California, en períodos de diez días de duración cada año. En el resto de la costa oeste se han calculado proporciones similares. Sin embargo, las tormentas han causado al mismo tiempo más del 80 por ciento de los desbordamientos de los ríos de California y el 81 por ciento de las 128 rupturas de diques mejor documentadas en el Valle Central.

Dado que los ríos atmosféricos constituyen el dramático desencadenante de las inundaciones, pero a la vez representan un vital aporte de agua, es comprensible preguntarse qué influencia ejercerá sobre ellos el cambio climático. Cabe recordar que Zhu y Newell acuñaron el término «río atmosférico» para describir ciertas peculiaridades que observaron en los modelos meteorológicos. Estos guardan una estrecha relación con los utilizados para predecir las consecuencias derivadas de un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. En ellos no se programan específicamente los ríos atmosféricos; estos emergen como una consecuencia natural del modo en que operan la atmósfera y el ciclo hidrológico al simular situaciones pasadas, presentes y futuras. De ahí que aparezcan también en los modelos de predicción climática en las evaluaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

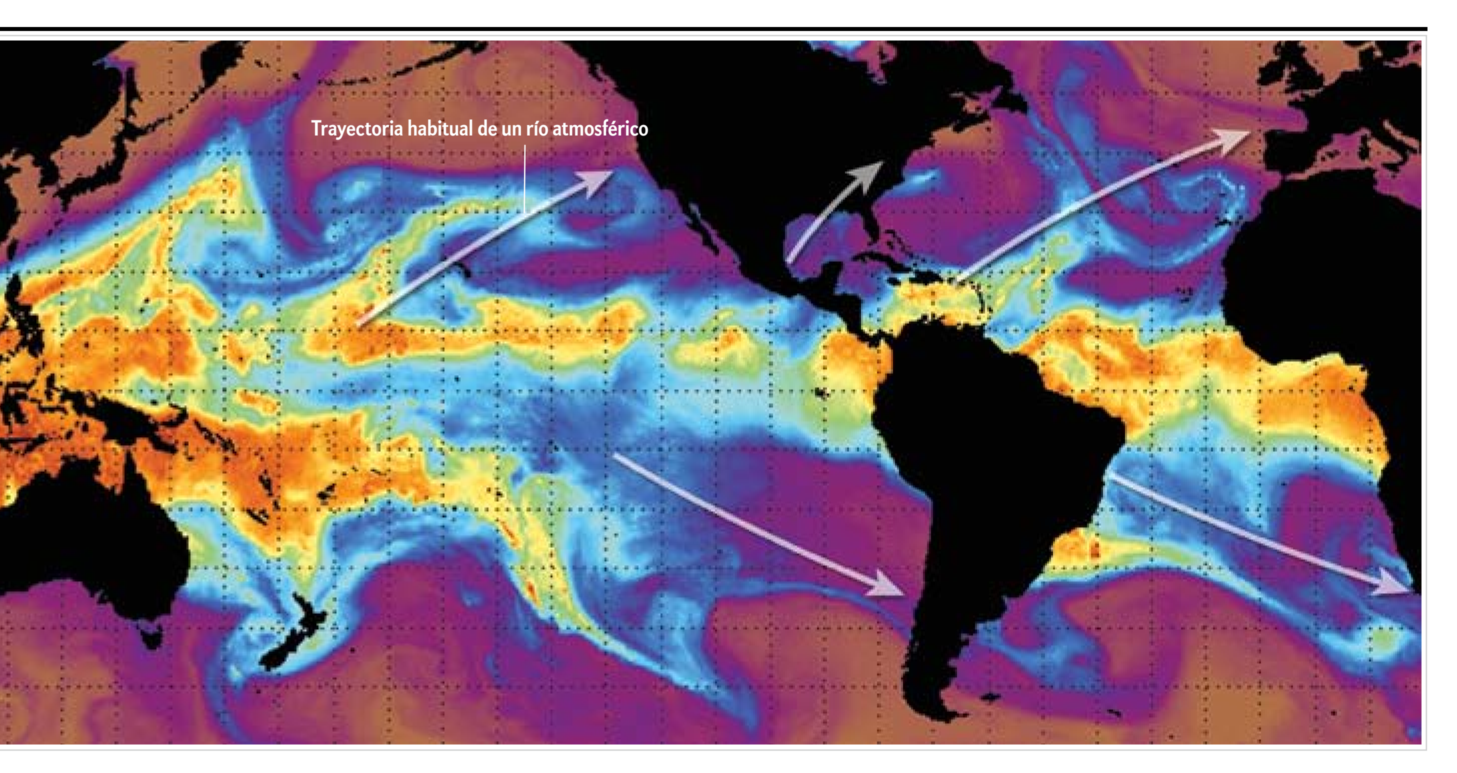
Uno de los autores (Dettinger) ha revisado hace poco siete modelos climáticos realizados en todo el mundo y ha concluido que seguirán llegando ríos atmosféricos a California a lo largo del siglo xxi. En las predicciones, las temperaturas del aire aumentan una media de unos 2,2 ºC en respuesta a un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero. Dado que una atmósfera más cálida retiene una mayor cantidad de vapor de agua, los ríos atmosféricos podrían transportar más humedad.

Por otro lado, puesto que se prevé que los trópicos y las regiones polares se calienten a distintas velocidades, se espera que los vientos sobre las latitudes medias del Pacífico se debiliten ligeramente. El volumen de lluvia generado por los ríos atmosféricos depende sobre todo de la cantidad de vapor que retienen y de la velocidad a la que se desplazan. Por tanto, cabe preguntarse si resultará más determinante el cambio en la humedad del aire o el de los vientos. Seis de los siete modelos climáticos apuntan a que la lluvia y la nieve que descargarán los ríos atmosféricos en California aumentarán en promedio un 10 por ciento hacia 2100. El incremento en la humedad del aire tendrá, pues, mayor peso que unos vientos atenuados.

Los siete modelos predicen que también ascenderá el número de ríos atmosféricos que alcanzan la costa californiana, desde un promedio histórico de nueve hasta once. Prevén asimismo que ocasionalmente se producirán episodios más graves que cualquier megatormenta sucedida hasta ahora. Dado el papel clave que han desempeñado los ríos atmosféricos en las inundaciones de California, incluso unos aumentos tan moderados constituyen un motivo de preocupación y deben continuar investigándose para asegurar la fiabilidad de las predicciones.

TIEMPO PARA TOMAR MEDIDAS

Vista la probabilidad de que aumente la frecuencia y la intensidad de los ríos atmosféricos, y dada la numerosa población



que reside hoy en sus trayectorias, ha llegado el momento de que la sociedad tome medidas. Con el fin de facilitar a los gestores de emergencias de California un ejemplo que les permita evaluar su planificación y metodología actuales, los científicos del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. (USGS) han reconstruido el escenario mencionado al comienzo de nuestro artículo: una megatormenta de magnitud semejante a la de 1861-62, pero con una duración de 23 días en lugar de 43. Para que la simulación, apodada ARkStorm (*Atmospheric River 1000 Storm*), resultara lo más realista posible, se han combinando los datos de dos de las secuencias de tormentas más intensas acontecidas en California en los últimos 50 años: enero de 1969 y febrero de 1986.

Los responsables del proyecto han realizado las simulaciones de ARkStorm en un amplio conjunto de condiciones meteorológicas, índices de precipitación y modelos económicos y tecnológicos. Los resultados indican que podrían producirse inundaciones continuadas en la mayor parte de las regiones bajas del norte y del sur de California. Tales eventos podrían conllevar la evacuación de 1,5 millones de habitantes. Los daños y las alteraciones causadas por los torrentes, así como por centenares de deslizamientos y vientos de fuerza huracanada en determinadas localidades, podrían causar pérdidas de 400.000 millones de dólares por daños en propiedades y en la agricultura. La interrupción de las actividades económicas y del empleo podría acarrear costes totales de más de 700.000 millones de dólares. A juzgar por los desastres acaecidos en el planeta en los últimos años, se piensa que tal calamidad podría quitar la vida a miles de personas (la simulación ARkStorm no predice el número de víctimas).

Los costes casi triplican los estimados por algunos de los miembros del proyecto del USGS que habían trabajado con otro escenario catastrófico denominado ShakeOut: un hipotético terremoto de magnitud 7,8 en el sur de California. Una megatormenta desatada por un río atmosférico podría suponer un mayor riesgo para el estado que un terremoto de gran magnitud. Resulta verosímil, incluso tal vez inevitable, que un evento de tipo ARkStorm afecte a California. Y los sistemas estatales de protección de inundaciones no están diseñados para lidiar con él. El único aspecto esperanzador es que hoy contamos con avances científicos y tecnológicos que permitirían prever tales episodios en cualquier lugar con días o más de una semana de antelación. Una planificación adecuada y un esfuerzo continuado por mejorar las predicciones podrían reducir los daños y las víctimas mortales.

La misma promesa, y también la advertencia, pueden aplicarse a las costas occidentales de otros continentes. Los ríos atmosféricos se han estudiado con mayor detalle en la costa californiana que en el resto del mundo, pero no hay motivos para esperar que las tormentas resulten menos frecuentes e intensas en otros puntos. La próxima megainundación podría suceder en Chile, España, Namibia o el oeste de Australia.

Los californianos, así como los habitantes de la costa occidental de Estados Unidos, deberían concienciarse de las amenazas que suponen los ríos atmosféricos y tomarse muy en serio las predicciones de tormentas e inundaciones. Los responsables de planificación y los líderes políticos de las zonas urbanas deberían, asimismo, tenerlo en cuenta en sus decisiones sobre inversiones futuras. Quien olvida el pasado puede hacer que este se repita.

PARA SABER MÁS

Lluvias torrenciales. Clemente Ramis et al. en *Investigación y Ciencia*, n.º 296, mayo de 2001.

Holocene paleoclimate records from a large California bay estuarine system and its watershed region: Linking watershed climate and bay conditions. Frances P. Malamud-Roam et al. en *Quaternary Science Reviews*, vol. 25, n.º 13-14, págs. 1570-1598, julio de 2006.

Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. Michael D. Dettinger y F. M. Ralph en *Eos*, vol. 92, n.º 32, pág. 265, 2011.

Design and quantification of an extreme winter storm scenario for emergency preparedness and planning exercises in California. Michael D. Dettinger et al. en *Natural Hazards*, vol. 60, n.º 3, págs. 1085-1111, febrero de 2012.

por Norbert Treitz

Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.



Historias del calendario

¿Cómo acompasar las medidas de la rotación terrestre con el curso de las estaciones?

Que la Tierra orbite alrededor del Sol de un modo tan regular se debe, sobre todo, al hecho de que nuestra estrella no forma parte de un sistema estelar múltiple. De ser el caso, los planetas seguirían trayectorias caóticas —en el sentido estricto del término— y los calendarios carecerían de sentido... siempre que hubiera seres para confeccionarlos, ya que la vida en un planeta con una órbita tan errática apenas habría tenido oportunidad de desarrollarse.

Nuestro acogedor planeta nos brinda la posibilidad de medir el tiempo con ayuda de un aparato astronómico: el reloj solar. En efecto, visto desde la Tierra, el Sol avanza siempre en el mismo sentido; es decir, su movimiento nunca es retrógrado, gracias a lo cual podemos usarlo para medir las horas. (En Mercurio, por el contrario, no siempre resultaría posible determinar la hora a partir de la posición del Sol [*véase* «Relojes de sol en Mercurio y la Tierra», por Norbert Treitz; Investigación y Ciencia, junio de 2012].)

Hoy en día podemos construir relojes atómicos más precisos que la misma Tierra. Desde 1967, el segundo se define a partir de las propiedades de cierto estado excitado del átomo de cesio. No por casualidad, 86.400 (60 × 60 × 24) de esos segundos atómicos coinciden, con muy buena aproximación, con el tiempo medio que tarda el Sol en alcanzar dos veces consecutivas su máxima altura sobre el horizonte, intervalo temporal que recibe el nombre de «día solar medio». La definición de segundo atómico se escogió para que se asemejase a la convención usada hasta entonces, según la cual un segundo se definía como la fracción 1/86.400 del día solar medio. Para la física, sin embargo, una ciencia libre de los accidentes de nuestra existencia terrícola, semejantes consideraciones carecen de relevancia.

Debemos agradecer a la tradición una rara transposición de términos. Lo que marca un reloj solar, que representa el ángulo de rotación terrestre con respecto a la posición del Sol, recibe el nombre de «hora solar real». En cambio, su conversión al tiempo físico se denomina «hora solar media». Esta elección posee más o menos la misma lógica que tendría llamar «hora real» a lo que marcase un péndulo sin sistema compensador de la temperatura en una vivienda sin calefacción (ya que en verano oscilaría con mayor lentitud que en invierno).

A pesar de su notable regularidad, la órbita de la Tierra no es del todo uniforme. Una razón la hallamos en las leyes de Kepler. Nuestro planeta no describe una circunferencia alrededor del Sol, sino una elipse, lo que implica que su distancia al astro varía a lo largo del año. Además, la Tierra se mueve más rápido cuanto menor es su distancia al Sol. Esto último se deduce de la segunda ley de Kepler («el radio vector barre áreas iguales en tiempos iguales») o, de modo equivalente, del principio de conservación del momento angular. Aunque lo único que este exige es la constancia del momento angular total del sistema solar, y no de cada planeta por separado, estos interaccionan tan poco entre sí que podemos desestimar sus intercambios mutuos de momento angular.

Por tanto, visto desde la Tierra, el Sol «se adelanta» cuando se aproxima al perihelio (el punto en que se halla más cercano a nuestro planeta) y «se retrasa» cuando se encuentra a mayor distancia. Esa desviación puede llegar hasta los 8 segundos al día. Sumada, llega a acumular un total de 7 minutos que, no obstante, acaban compensándose en el curso de un año. Por su parte, la inclinación del eje de rotación terrestre causa una deriva de reloj de período semestral de hasta 20 segundos por día, los cuales suman hasta 8 minutos de adelanto o retraso.

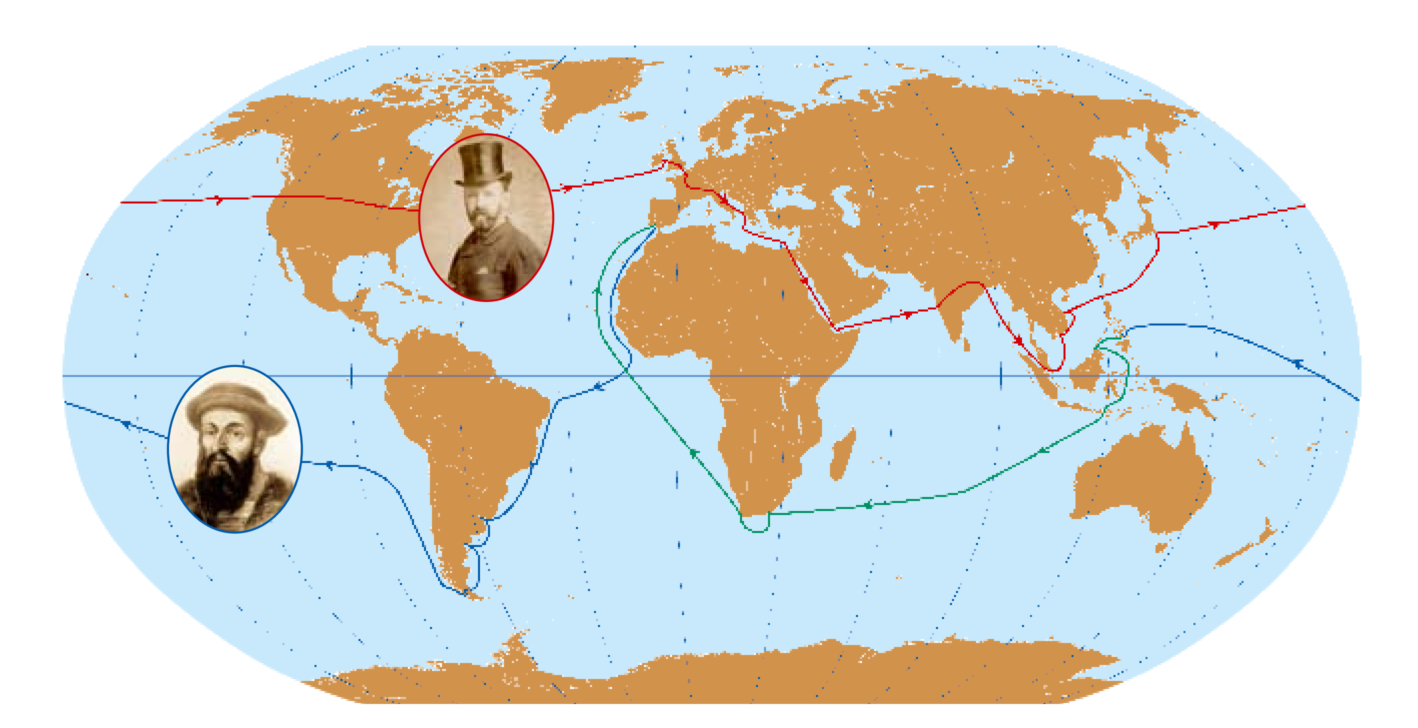
Solo durante los eclipses de Sol nos apercibimos de cómo cambia su tamaño aparente en función de su distancia a la Tierra. Dependiendo de si el diámetro aparente de la Luna (que varía aún más) supera o no al del Sol, llegará esta a ocultarlo o solo a cubrirlo de modo parcial, dejando ver una corona. Curiosamente, no hace más calor cuando nos hallamos más próximos al Sol, ya que la desviación de la órbita terrestre con respecto a una circunferencia resulta mínima.

Rotaciones posibles

Nada obliga a un planeta a rotar sobre sí mismo. Y, si lo hace, ese movimiento puede ser tan lento como su período orbital, caso en el que siempre mostrará una misma cara a su estrella. Debido a las fuerzas de marea, la Tierra y la Luna ya han sincronizado sus movimientos de esa manera [*véase* «Mecánica celeste con rozamiento», por Norbert Treitz; Investigación y Ciencia, junio de 2013]. Aunque hasta hace unas décadas se pensaba que el mismo fenómeno sucedía en Mercurio, dicha suposición quedó refutada en 1965 mediante observaciones por radar.

Si el período orbital y el de rotación difieren, entonces tendremos cambios «diarios»; esto es, modificaciones periódicas de iluminación y calor debidas al giro del planeta sobre su propio eje. Sin embargo, ello no implica que haya estaciones. En un planeta con una órbita circular y un eje de rotación paralelo al de la órbita, el día y la noche mostrarían la misma duración en todas partes. En el caso de la Tierra, su eje de rotación se encuentra inclinado con respecto al eje orbital 23,44 grados. En Marte, esa desviación asciende a 25,2 grados.

Consideremos el caso extremo de una inclinación de 90 grados; esto es, un eje de rotación contenido en el mismo plano que la órbita. Si dicho eje se hallase orientado hacia el Sol, un hemisferio viviría siempre de día y el otro se hallaría en permanente noche. Pero si el eje de rotación fuese



LA TRIPULACIÓN DE MAGALLANES regresó a España el 6 de septiembre de 1582 (*línea azul; en verde, tras la muerte de Magallanes*). Sin embargo, según su cuaderno de bitácora, aquel día corría el 5 de septiembre. En cambio, Phileas Fogg, el protagonista de la novela de Julio Verne *La vuelta al mundo en ochenta días*, ganó contra todo pronóstico la apuesta sobre su viaje (*línea roja*) debido a que sus sedentarios contemporáneos habían contado un día menos que él.

ISTOCKPHOTO/NATASA RADIC/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* (*mapa*); ISTOCKPHOTO/DUNCAN P. WALKER (*hombre con sombrero de copa*); DOMINIO PÚBLICO (*Fernando de Magallanes*)

tangencial a la órbita, entonces todo el planeta disfrutaría de idénticos cambios de claridad y oscuridad. Lo mismo sucedería con una inclinación de cero grados.

En casos no tan extremos, como nuestros 23,44 grados, tales efectos se ven debilitados. En el hemisferio norte, por ejemplo, cuando el semieje septentrional apunta hacia el interior de la órbita, tiene lugar el verano. Durante el equinoccio, el efecto coincide con el que observaríamos en el caso hipotético de una inclinación de 90 grados.

El intervalo entre dos equinoccios, o período de las estaciones, se denomina año trópico. Este posee una duración de 365,2419 días solares medios. Debido a la precesión del eje terrestre (cuyo período asciende a unos 25.750 años), el año trópico resulta 21 minutos más breve que el año sideral, o tiempo que tarda el Sol en aparecer en el mismo lugar con respecto a las estrellas fijas.

Años bisiestos

Si celebrásemos el Año Nuevo cada 365 días, la llegada de las estaciones se adelantaría unas seis horas al año. Por tanto, volverían a su momento de partida cada 365/(365,2419−365) años, lo que equivale a unos quince siglos. Los calendarios se encargan de suprimir ese efecto. Un buen calendario debería transcurrir en sincronía con las estaciones y, en caso de que resultase necesario, recurrir a una mezcla de años de 365 y 366 días. Una buena proporción parece ser de 4 a 1, lo que supone aproximar el año trópico por 365,25 días. Aunque parece bastante aceptable, la diferencia con el año trópico real que implica esa elección desplaza la llegada de las estaciones en un día cada 123 años, aproximadamente.

El calendario juliano ya se encargaba de llevar a cabo dicha aproximación. Cada cuatro años, se intercalaba un día adicional tras el sexto día antes de las calendas de marzo (el 1 de marzo). La tradición romana mandaba contar ese sexto día dos veces, costumbre a la que deben su nombre los años bisiestos (del vocablo latino *bisextus*).

En la época del Primer Concilio de Nicea, celebrado en el año 325 «después de Cristo» (cuyo nacimiento no fue datado hasta seis siglos después, presuntamente con un error de 7 años), la primavera comenzaba el 21 de marzo. Hacia el siglo XVI, sin embargo, y como consecuencia de la excesiva duración del año juliano, su inicio se había adelantado en unos diez días, hasta el 11 de marzo.

De haber continuado así, Semana Santa y Navidad habrían acabado por coincidir unos 13.000 años más tarde. Ello se debe a que, durante el Bajo Imperio Romano, la Navidad fue fijada en el 25 de diciembre, día en que también se celebraba el nacimiento del dios Mitras (resulta vano buscar en la Biblia ninguna fecha similar). Sin embargo, la Semana Santa se halla ligada a la celebración de la Pascua judía, la cual depende de las fases lunares. En concreto, la Semana Santa comienza el domingo posterior a la primera luna llena de primavera. Por tanto, esta festividad, ligada a las estaciones, acabaría recorriendo todo el calendario si su pequeño desfase con el año trópico no se corrigiese. En este sentido, el calendario juliano se excedía, lo que provocaba que las estaciones se desplazasen hacia atrás.

Dada su costumbre a pensar a largo plazo, la Iglesia romana no encontró aceptable que la primavera se adelantase al 11 de marzo (y con ella la celebración de la Semana Santa: llamémoslo problema I) ni tampoco que la misma deriva continuase en el futuro (problema II). Así pues, en 1582 el papa Gregorio XIII dispuso un nuevo calendario con el objetivo de solucionar ambos problemas. Desde una perspectiva moderna, sin embargo, tal vez habría sido mejor tratar ambos problemas de manera independiente.

El problema II se soluciona reduciendo de 100 a 97 los días intercalares que hay cada 400 años. Para ello, basta con decretar que los años 1700, 1800, 1900, 2100, 2200, 2300, 2500... no sean bisiestos. De esta manera, la duración promedio del año según el calendario asciende a 365,2425 días, una excelente aproximación a los 365,2419 días del año trópico. Ello ralentiza lo suficiente el desplazamiento de las estaciones no solo para el ciudadano de a pie o el agricultor, sino también para la Iglesia.

Si la reforma gregoriana se hubiese limitado a ese cambio, no habría sucedido nada hasta el 28 de febrero de 1700. Solo entonces el nuevo calendario habría comenzado a diferenciarse del juliano, aunque solo por un día. Hoy, la primavera aún comenzaría el 11 de marzo, pero la diferencia con el calendario juliano solo habría acumulado dos días más, uno en 1800 y otro en 1900. Y, a buen seguro, esta pequeña reforma habría sido aceptada por los países no católicos. (Curiosamente, numerosas naciones acabaron adoptando el calendario gregoriano, mucho más drástico, en el año decisivo de 1700.)

Para resolver el problema I, sin embargo, debían añadirse de alguna manera los 10 días que faltaban para que la primavera volviese a comenzar el 21 de marzo. En los países católicos, incluidos los miembros del Sacro Imperio Románico Germánico y los cantones suizos, se decretó que al 5 de octubre de 1582 siguiese el 15 de octubre. No obstante, en aquella época de amargas rivalidades entre confesiones, aceptar semejante reforma papal hubiera sido considerado por muchos una sumisión inaceptable. En consecuencia, durante siglos los días se contaron de manera diferente en los distintos países de Europa, lo que provocó todo tipo de confusiones y coincidencias curiosas.

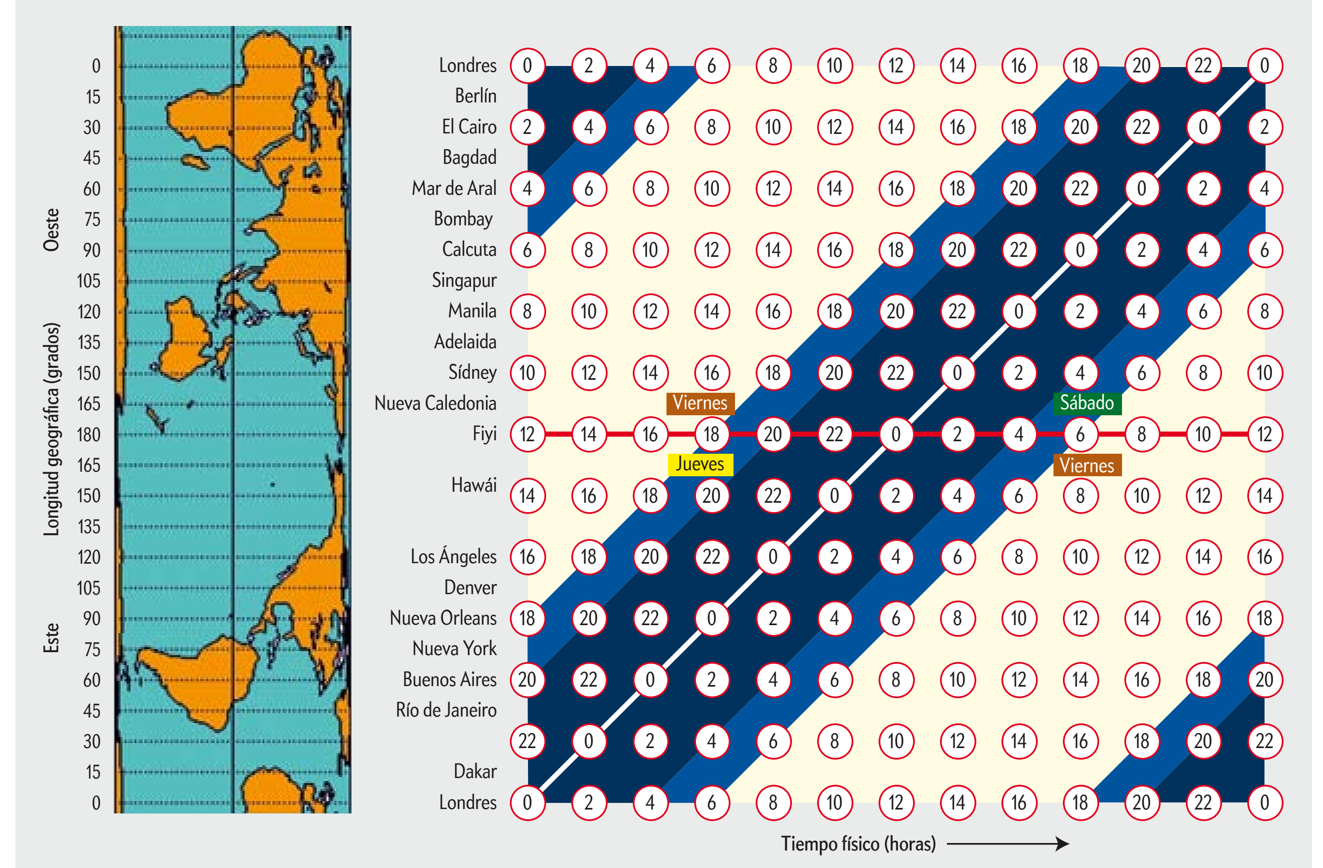
Por ejemplo, Miguel de Cervantes murió el 23 de abril de 1616 en España, donde se aplicaba el nuevo calendario. En Inglaterra, donde aún no se hallaba en vigor, corría la misma fecha al fallecimiento de William Shakespeare. La UNESCO declaró por ello el 23 de abril como Día Mundial del Libro. Sin embargo, y aunque menudo se habla del «aniversario de la muerte de Cervantes y Shakespeare», estos no fallecieron el mismo día, sino que el último sobrevivió diez días al primero.

TODAS LAS HORAS (LOCALES) DEL MUNDO

Este diagrama muestra los husos horarios y los días del calendario en las zonas horarias (idealizadas) de la Tierra para un período de tiempo escogido al azar. En el esquema de la derecha debemos imaginar que el extremo superior e inferior se hallan unidos (al igual que en el mapamundi de la izquierda). Hacia la derecha o la izquierda, el diagrama podría extenderse tanto como quisiéramos.

Si todos los relojes del mundo se hallasen sincronizados (si, por ejemplo, marcaran las 00:00 horas cuando en Londres es medianoche), entonces «un día» (entendido como el conjunto de todos los puntos del diagrama en los que, por ejemplo, es viernes) formaría un rectángulo.

Por el contrario, según la convención actual, en la que cada reloj señala las 00:00 horas cuando llega la medianoche local, los puntos que pertenecen a un mismo día conforman un paralelogramo delimitado por la diagonal de la medianoche (*blanco*) y la línea de cambio de fecha (*rojo*). Aquí, el paralelogramo correspondiente al viernes se ha diseccionado en dos partes (*superior izquierda e inferior derecha*); otras zonas de él se encuentran fuera del diagrama.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN NORBERT TREITZ

Aunque no creamos en la transmutación de las almas, para un físico no deja de resultar curioso que Newton naciera el mismo año en que murió Galileo (1642). Pero ¿ocurrió así? Si nos documentamos sobre el nacimiento de Newton, podremos encontrar dos años diferentes, según el calendario considerado. Y hallaremos, además, una aparente inexactitud, aunque ajena en este caso a la reforma gregoriana. Si nos atenemos a la fecha que figura grabada en su lápida, el físico falleció el 20 de marzo de 1726. Sin embargo, parece ser que no fue enterrado hasta el 28 de marzo de 1727. ¿Cómo es posible? La razón se debe a que, en la Inglaterra de aquella época, el Año Nuevo (¡con cambio de número de año!) se celebraba el 25 de marzo, día en que se festejaba la Anunciación de la Virgen María. Según el calendario gregoriano, Newton murió el 31 de marzo de 1727.

Ya que Rusia se concedió hasta 1918 para adoptar el calendario gregoriano, para la mayor parte del mundo corría el 7 de noviembre de 1917 cuando estalló la Revolución de Octubre. Sin embargo, al viernes 6 de octubre de 1867, día en que se hizo efectiva la venta de la América Rusa a EE.UU., siguió el viernes 18 de octubre. Y si en aquel momento no se hubiese trasladado la línea internacional de cambio de fecha de la frontera ruso-canadiense al estrecho de Bering, el día en que Alaska pasó a manos estadounidenses habría sido el sábado 19 de octubre.

La línea de cambio de fecha

Si el avión, el teléfono y la radio se hubieran inventado antes que los relojes, seguramente tendríamos en todo el planeta una hora común y una misma fecha; sin embargo, el mediodía no acontecería a las 12:00 en todo lugar (algo que en cualquier caso tampoco sucede hoy).

Quien peregrine desde el noreste de Noruega hacia Santiago de Compostela no tendrá por qué cambiar la hora. En cambio, quien dé la vuelta al mundo y, como hicieran Fernando de Magallanes o Phileas Fogg, el protagonista de *La vuelta al mundo en ochenta días*, cuente cada amanecer como el comienzo de un nuevo día, acabará su viaje con un desfase de una jornada. Si se procede hacia el este, los días así contados serán de menor duración que los normales.

No obstante, los primeros exploradores adoptaron la costumbre de poner en hora su reloj a las 12:00 durante el mediodía local, en lugar de mantenerlo sincronizado con la hora de su país de origen. Así, mientras en Nueva York son las 07:00 de la mañana, en Londres el reloj marca las 12:00 del mediodía. Pero ¿qué sentido tiene una convención así en nuestra época, en la que los viajes a lugares lejanos resultan cada vez más frecuentes y en la que los datos se transmiten de forma global? ¿Acaso la hora a la que nos levantamos y aquella a la que nos acostamos son simétricas con respecto a las 12:00? ¿Dónde se sitúa la mitad del horario comercial?

Si los emigrantes de antaño hubieran sabido que hoy podrían hacerse llamadas transoceánicas, posiblemente habrían conservado la misma hora que en sus respectivos países. Desde luego, al llamar por teléfono aún tendríamos que pararnos a reflexionar si tal vez despertaremos a nuestro interlocutor, pero el hecho de que un comercio abra a las 10:00, a las 20:00, o de 04:00 a 14:00 resulta del todo irrelevante.

Las complicaciones, sin embargo, llegarían con el cambio de fecha. Si, por ejemplo, en todo el globo se fijaran las 12:00 horas cuando el sol alcanza su punto más alto (de media) en Greenwich, numerosos países se verían obligados a cambiar de fecha a plena luz del día. Por tanto, si preferimos que el cambio de fecha llegue mientras dormimos, resulta inevitable dividir el orbe en husos horarios. Ello implica que siempre habrá lugares vecinos entre los cuales mediará una hora de diferencia, pero que sin embargo vivirán en distinta fecha y día de la semana.

Para que las consecuencias no resulten demasiado drásticas, se ha aprovechado un meridiano que cruza el Pacífico sin atravesar ningún continente y que, en su lugar, pasa por el estrecho de Bering, entre Siberia y Alaska. No obstante, la verdadera línea de cambio de fecha no es recta, sino que transcurre en zigzag, a fin de evitar algunas islas Estado. Dicha línea llegó a moverse a principios del año 2000 para atraer turistas con motivo del cambio de milenio (turistas que no solo tomaron semejantes convencionalidades como verdades absolutas, sino que creyeron, erróneamente, que un milenio termina cuando comienza el milésimo año, y no cuando finaliza).

PARA SABER MÁS

El futuro del tiempo. David Finkleman et al. en *Investigación y Ciencia*, n.º 423, diciembre de 2011.

por Bartolo Luque



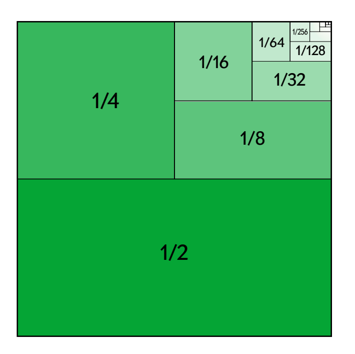
Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Demostraciones visuales

Una imagen vale más que mil palabras (o no)

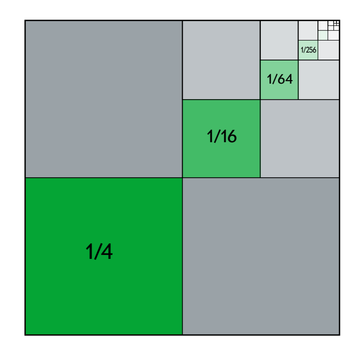
En matemáticas y en física resulta habitual toparse con series geométricas, aquellas en las que la razón entre términos sucesivos es constante. Coloreadas con las paradojas de Zenón, dichas series nos revelan cómo es posible que una suma de infinitos pasos finitos dé como resultado una cantidad finita. Este hecho, que suele demostrarse por métodos algebraicos, deja un recuerdo indeleble en los alumnos con sensibilidad matemática —en el resto, el recuerdo también es indeleble, pero de otro tipo.

En mis clases de probabilidad suelo encontrarme con alguna serie geométrica, como la clásica $1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \cdots$. Para calcular esta suma con un método alternativo a la demostración algebraica estándar, dibujo en la pizarra este sencillo y conocido diagrama:



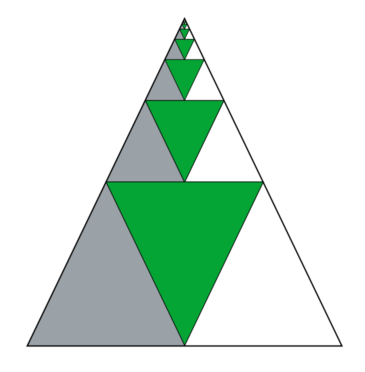
Parto de un cuadrado de área 1. Lo divido por la mitad y cubro una de las partes, de área 1/2. Después cubro la mitad de la mitad restante, cuya área vale 1/4. Resulta obvio que, si siguiera así *in saecula saeculorum*, acabaría cubriendo el cuadrado en su totalidad. Por tanto, la suma de la serie ha de valer 1.

¿Puede extenderse este enfoque visual a otras series geométricas? ¿Cómo abordaría el lector, por ejemplo, la serie geométrica de razón 1/4; es decir, $1/4 + 1/16 + 1/64 + 1/256 + \cdots$? En 1994, Sunday A. Ajose y Roger B. Nelsen propusieron en *Mathematics Magazine* esta «demostración sin palabras»:



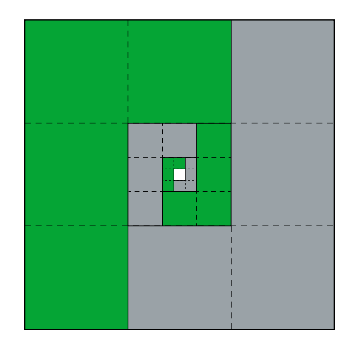
En este caso no recubrimos la figura entera. Dividimos el cuadrado de partida en cuatro piezas idénticas y pintamos primero el cuadrante inferior izquierdo, de área 1/4. Después repetimos la operación en el cuadrante superior derecho, de área igual a $1/4 \times 1/4 = 1/4^2$. Al iterar el proceso infinitas veces, habremos pintado 1/3 del área total: justo el valor de la suma de la serie que buscábamos. (Por lo que sabemos, esta fue una de las primeras series infinitas sumada por un matemático. Fue Arquímedes, cómo no, quien lo logró gracias a un método geométrico parecido.)

¿Resulta imprescindible partir de un cuadrado? No. Basta con una figura que pueda dividirse en cuatro partes idénticas que representen copias semejantes de la figura original. Un triángulo isósceles de área 1 cumple a la perfección este requerimiento, como mostró Rick Mabry en 1999 en *Mathematics Magazine* con esta figura, que recuerda la construcción del triángulo de Sierpinski:



Observemos que el quid de estas demostraciones se basa en el empleo de infinitas copias de diferentes tamaños de la figura original; cada parte corresponde a una versión reducida de la figura completa. La serie geométrica de razón 1/4 posee demostraciones visuales particularmente simples porque tanto un cuadrado como un triángulo pueden dividirse con facilidad en cuatro piezas semejantes, cada una de las cuales abarca 1/4 del área original.

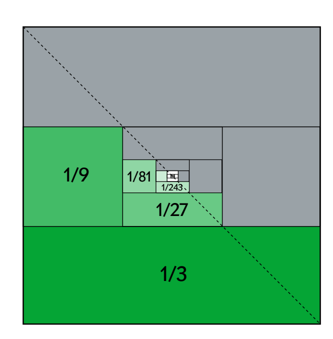
Armado con este conocimiento, ¿sabría el lector determinar qué serie geométrica está sumando el siguiente diagrama? Intente averiguarlo antes de seguir leyendo.



El cuadrado de área unidad se divide en 9 copias idénticas. Después, pintamos una L formada por 4 casillas consecutivas. El área de dicha L asciende, pues, a 4/9. Repetimos la misma operación sobre el cuadrado central, de área 1/9. La nueva L cubre ahora un área de $1/9 \times 4/9 = 4/9^2$. Si iteramos el proceso infinitas veces habremos pintado la mitad del cuadrado original, por lo que este diagrama constituye una demostración visual de la identidad $4/9 + 4/81 + 4/729 + 4/6561 + \cdots = 1/2$.

La autosemejanza puede combinarse con otros principios para construir pruebas visuales muy ingeniosas. El ejemplo que sigue emplea la simetría con respecto a una diagonal para demostrar que $1/3 + 1/9 + 1/27 + 1/81 + \cdots = 1/2$.

Ahora intente demostrar lo mismo, pero partiendo de un triángulo equiláte-



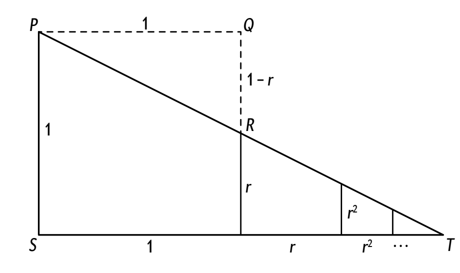
ro de área 1 y usando su baricentro para dividirlo en tres triángulos idénticos. Y ya que está en harina, intente también hallar una demostración visual para la serie geométrica de razón 1/5.

El caso general

Dado un número decimal periódico puro x, como x = 0,33333..., existe una técnica estándar para convertirlo en una fracción. Observemos que si multiplicamos x por 10, obtenemos $10x$ = 3,33333... Si ahora restamos al resultado el número x, nos desharemos de los infinitos decimales: $10x - x = 9x = 3$. Despejando, obtenemos que $x = 3/9 = 1/3$. (Gracias a esta técnica, el lector podrá comprobar que la igualdad 0,9999... = 1 no representa nada misterioso.)

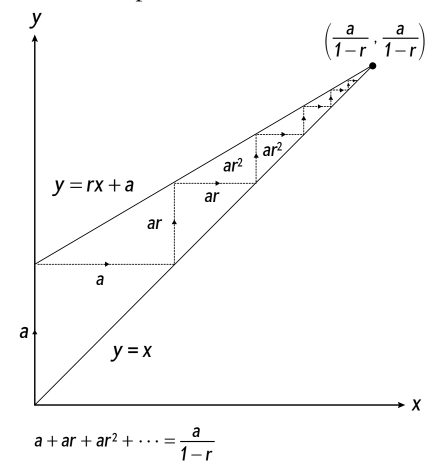
En realidad, un decimal periódico puro no es más que una forma disfrazada de una serie geométrica infinita, por lo que podemos usar la misma idea para calcular la suma de series geométricas. Si $S = 1 + r + r^2 + r^3 + \cdots$, entonces tenemos que $S - rS = 1$, lo que nos da $S = 1/(1 - r)$. He aquí la demostración algebraica estándar a la que nos referíamos al principio.

Cada una de las demostraciones visuales anteriores corresponde a una serie geométrica concreta. Pero ¿podemos encontrar una demostración visual general para una serie geométrica cualquiera de razón r (donde $0 < r < 1$)? Benjamin G. Klein e Irl C. Bivens propusieron en 1988 en *Mathematics Magazine* la siguiente perla:



Dividimos el triángulo $\triangle TSP$ en trapezoides semejantes. Como los triángulos $\triangle PQR$ y $\triangle TSP$ son semejantes, el cociente entre sus catetos es idéntico: $1 + r + r^2 + r^3 + \cdots = 1/(1 - r)$. Magistral.

La anterior no constituye ni mucho menos la única demostración posible. La que sigue, publicada en 2001 por The Viewpoints 2000 Group en *Mathematics Magazine* (pero que parece haber sido redescubierta varias veces), utiliza uno de los diagramas de araña tan queridos en sistemas dinámicos. La prueba resulta tan elegante que evitaré el *spoiler*. Disfrútela esta vez sin palabras:



¿Será el lector capaz de encontrar una demostración semejante para $a - ar + ar^2 - ar^3 + \cdots = a/(1 + r)$ (con $0 < r < 1$)?

¿Qué es una demostración?

Para un matemático, una demostración es una sucesión lógica de pasos que, partiendo de unas premisas tomadas como verdaderas, permiten decidir la verdad o falsedad de una afirmación. Para muchos, sin embargo, tal nombre debería reservarse para aquellos casos en los que la demostración es «comprobable» por la inspección de una única mente matemática.

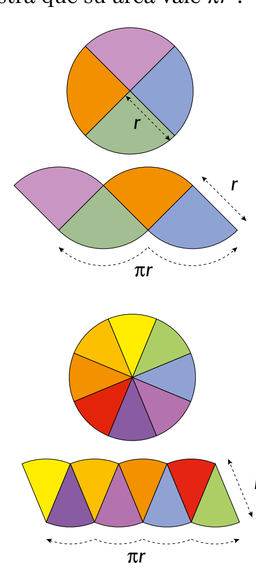
No obstante, en el último siglo han aparecido demostraciones de tal extensión y complejidad que, en la práctica, resulta casi imposible que un matemático las compruebe por sí solo. En algunos casos, un colectivo de especialistas trocea la demostración y da fe de la corrección de cada parte. En otros, la demostración requiere la confirmación de un número estratosférico de «casos», algo imposible para un ser humano, pero ideal para un ordenador. Algunos ejemplos históricos los hallamos en el teorema de los cuatro colores [*véase* «La solución del problema del mapa de cuatro colores», por Kenneth Appel y Wolfgang Haken; Investigación y Ciencia, diciembre de 1977] o la famosa conjetura del empaquetamiento de Kepler [*véase* «Empaquetamiento de esferas», por Neil J. A. Sloane; Investigación y Ciencia, marzo de 1984].

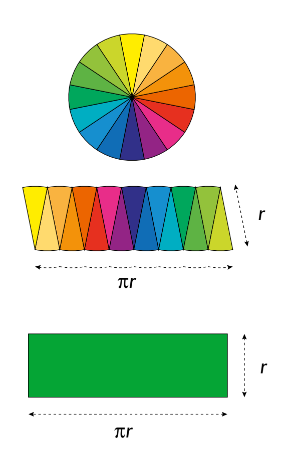
En su sentido más general y laxo, una demostración es aquello que nos convence —sin violentarnos— de que algo es cierto. Pero una buena demostración va más allá: nos revela también *por qué* algo es cierto. En ese sentido, las demostraciones visuales —o demostraciones sin palabras, basadas únicamente en imágenes o diagramas— nos ayudan a entender por qué se cumple una afirmación matemática; nos muestran vívidamente el motivo por el que una propiedad es verdadera y, a veces, incluso nos sugieren cómo demostrarla de manera formal.

Si bien su uso fue moneda de cambio en la Antigüedad y el Renacimiento, la matemática moderna, con su ímpetu formalista y su obsesión casi neurótica por el rigor, relegó estas joyas al olvido. Desde hace unas décadas, rescatadas primero por la didáctica y ahora reivindicadas desde el cómputo por ordenador y la matemática experimental, ocupan su merecido espacio en revistas como *Mathematics Magazine* o *College Mathematics Journal*. Aquí hemos elegido las series geométricas como hilo conductor, pero, como podrán imaginar y comprobar si echan un vistazo a la bibliografía, las pruebas visuales abarcan todas las áreas de la matemática.

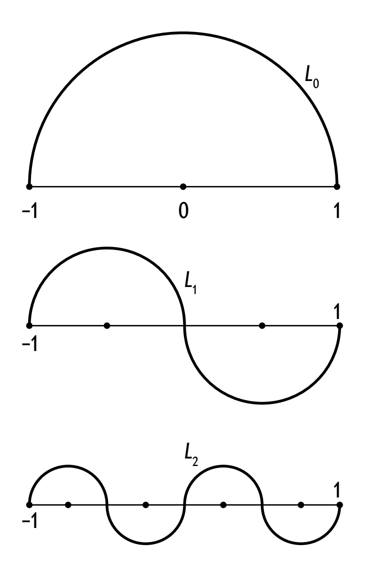
Falacias visuales

Como cualquier forma de argumentación, también las demostraciones visuales pueden ser víctimas de falacias y paradojas. En el capítulo 16 de *El placer de la X*, de Steven Strogatz, nos encontramos con esta deliciosa demostración visual que, partiendo del perímetro de un círculo, $2\pi r$, nos demuestra que su área vale πr^2:





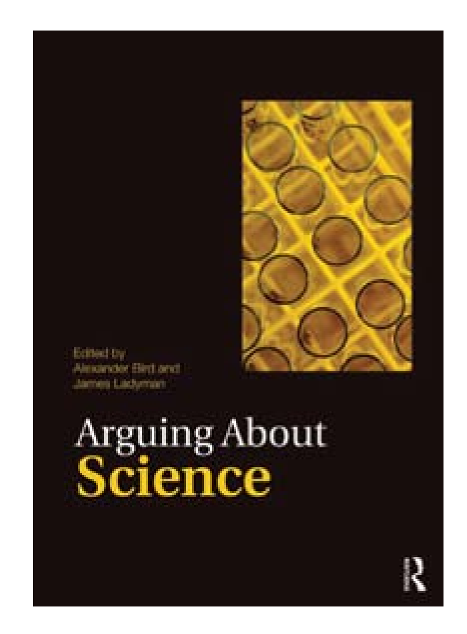
Al leerlo, recordé de inmediato otra demostración parecida que suelo presentar a mis alumnos —sin discriminación, tanto a los sensibles como a los insensibles—:



Observe que la sucesión de curvas L_0, L_1, L_2, ..., L_n se aproxima cada vez más al segmento [–1, 1], hasta coincidir exactamente en el límite $n \to \infty$. Sin embargo, todas las curvas miden $L_n = 2^n (\pi/2^n) = \pi$, con independencia de cuánto valga n. Luego estamos «viendo» que $\pi = 2$. (Si prefiere demostrar que $2 = 1$, bastará con que, en lugar de un semicírculo, tome un triángulo equilátero de lado 1 y aplique un proceso parecido.) ¿Por qué la demostración de Strogatz es correcta y esta no?

PARA SABER MÁS

Demostraciones sin palabras. Roger B. Nelsen. Proyecto Sur Ediciones, 2001.
Proofs without words II: More exercises in visual thinking. Roger B. Nelsen. The Mathematical Association of America, 2000.
Math made visual: Creating images for understanding mathematics. Claudi Alsina y Roger B. Nelsen. The Mathematical Association of America, 2006.



ARGUING ABOUT SCIENCE

Edición preparada por Alexander Bird y James Ladyman. Routledge; Londres, 2013.

Ciencia

Presupuestos epistemológicos

Existe una benemérita tradición anglosajona de edición de introducciones generales a un autor. Lo mismo se trate de Kant que de Newton. Son los famosos *Companion to*. Otro tipo de colección es la que corresponde a la reunión de artículos clásicos (antiguos y recientes), agavillados por temas y explicados por una mano experta. A este género literario corresponde el libro de cabecera, antología que se organiza en torno a nueve secciones: ciencia, no ciencia y pseudociencia; ciencia, raza y género; razonamiento científico; explicación científica; leyes y causalidad; ciencia y medicina; probabilidad y ciencia forense; riesgo, incertidumbre y política científica; realismo científico y antirrealismo. Se mezclan, pues, problemas de larga historia en filosofía de la ciencia con otras cuestiones más apegadas a los intereses prácticos que rodean a la ciencia. Con un *caveat* general: podemos alcanzar mucho conocimiento *bona fide* que no es científico.

Suele ser moneda de uso corriente la idea de que el avance de la ciencia entraña, a modo de consecuencia inevitable, la retirada del pensamiento filosófico. De manera rutinaria, se menciona el caso de los atomistas de la Grecia clásica que especulaban sobre la naturaleza de la realidad material, una especulación que se fue sustituyendo por el desentrañamiento de los componentes últimos de la materia con el avance de la química y la física. De igual modo, la psicología experimental y la neurociencia se hallarían ahora colonizando un territorio que fue antaño dominio soberano de filósofos, poetas y artistas; aspectos de la mente humana tales como la imaginación, el lenguaje y el libre albedrío quedarían, en un breve plazo de tiempo, confinados dentro del vallado exclusivo de la ciencia. Pero la propia ciencia ha servido para retroalimentar, con sus nuevos conocimientos, cuestiones de muchos ámbitos de la filosofía. Pensemos, por ejemplo, en el progreso de la investigación cerebral y los dilemas neuroéticos que comporta. Por otro lado, la naturaleza, métodos y objetivos de la ciencia se hallan en continuo proceso de contrastación y evolución. La reflexión filosófica sobre ello ha contribuido a la depuración del propio quehacer científico.

En el sentir común, la ciencia va asociada a lógica, investigación empírica, razón y racionalidad. El significado original del término *scientia* es conocimiento, no uno cualquiera, sino el dotado de pruebas, justificación y razón. La palabra no se empleó en su sentido técnico actual hasta el siglo XIX, cuando las disciplinas y las instituciones científicas alcanzaron su madurez tras sus inicios dos centurias antes, a partir de raíces antiguas y medievales. Ese advenimiento de la revolución científica, a mediados del siglo XVII, tiene su componente más destacado en el giro copernicano, que sustituyó la idea de una Tierra fija e instalada en el centro del universo (geocentrismo) por la hipótesis de unos planetas, incluido aquélla, que se movían alrededor del Sol (heliocentrismo). No se trataba de una disputa solo astronómica, sino que además ponía en cuestión la física aristotélica, en particular la explicación de la gravedad.

Otra característica de la revolución científica que merece mencionarse, en cualquier historia de la ciencia por breve y sumaria que sea, concierne al desarrollo extraordinario del conocimiento en numerosos dominios en un período corto de tiempo. Recordemos: las leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas (1609), la circulación de la sangre (Harvey, 1628), la primera ley de los gases ideales (Boyle, 1662) y la mecánica de Newton (1689). Menos la tercera, todas implicaban el abandono de ortodoxias muy arraigadas. Kepler arruinó la idea antigua de que todos los movimientos celestes eran circulares. Con Newton desapareció la creencia de que todo movimiento venía causado por contacto, con su fuerza gravitatoria misteriosa, aunque matemáticamente precisa (*actio in distans*). Harvey rechazó la ortodoxia que arranca de Galeno según la cual la sangre es creada por el hígado y la función del corazón se limita a aportar calor. La mecánica de Newton introdujo los conceptos de masa, fuerza y velocidad; constaba de tres leyes del movimiento y una ley de gravitación universal; unificó con acierto las leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas, las leyes de Galileo sobre la caída libre y el péndulo; explicaba las mareas en términos de la gravedad lunar; y predijo la vuelta del cometa Halley, la existencia de Neptuno y el hecho de que la Tierra no es redonda, sino achatada por los polos.

Revela también la historia que la ciencia no es siempre fiable. Abundan los ejemplos de tesis asentadas que resultaron erróneas. Lo habitual es que la corrección y refinamiento del conocimiento establecido ocurra en los márgenes, aunque hay también revisiones en componentes fundamentales de las teorías. En todo caso, someter las teorías y métodos científicos a permanente escrutinio se hace obligado para descubrir puntos débiles. Si ponemos las teorías en el centro de la naturaleza de la ciencia, les exigiremos precisión matemática, leyes que unifiquen fenómenos dispares y poder predictivo (de hechos que no se han observado todavía). Este enfoque, no obstante, adolece de ciertas limitaciones. La ciencia contiene teorías muy heterogéneas que cubren un amplio espectro de temas y que cambian en el curso del tiempo. Se dice a menudo que no existen leyes estrictamente matemáticas fuera de la física y, aunque ello pudiera ser una exageración, existe, sin

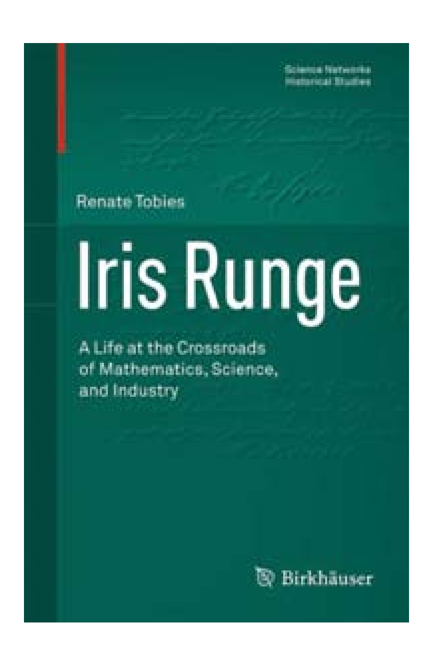
duda, una manifiesta distancia entre las teorías de la física y las teorías de otras ciencias. En una perspectiva positivista de la ciencia, persistente en muchos círculos, el fin de toda ciencia estriba en articular leyes generales bajo las cuales subsumimos todas las observaciones particulares y específicas.

Ahora bien, en última instancia, el problema de separar la ciencia de lo que no lo es se denomina problema de demarcación. Las condiciones que nos facultan para hablar de ciencia son los criterios de demarcación, cuyo desarrollo debemos a Karl Popper. Ningún filósofo ha ejercido tanta influencia sobre el concepto de ciencia. La idea fundamental que introdujo fue negativa. Para Popper la ciencia no versa sobre la prueba y la certeza, sino sobre la refutación y la conjetura. En el marco de su racionalismo crítico, los científicos deben aceptar siempre teorías de una manera provisional; hemos de vivir sin certeza en el conocimiento científico (falibilismo).

Hasta entonces predominaba la explicación inductivista. Por inducción generalizamos a partir de los casos observados. Se trata de un componente básico de la cognición humana que utilizamos en cada momento de forma inconsciente, aunque se supone que, en ciencia, la universalización ha de fundarse en un número sustantivo de datos. En ciencia, generalizar a partir de casos específicos se denomina inducción enumerativa; suele esta expresarse como la inferencia desde «todos los Fs son Gs observados» hasta «todos los Fs son Gs», donde F y G denotan propiedades de cosas (F puede ser un planeta y G un objeto que se desplaza trazando una elipse). Hans Reichenbach generaliza esta forma de inducción como sigue: si se han observado m Fs y n de ellos son G, entonces la proporción de todos los Fs que son G es n/m. Newton se mostraba convencido de que su método era inductivo.

Popper se percató de que las teorías científicas genuinas eran, en realidad, falsables, en el sentido de que realizan predicciones que podrían resultar falsas. Cuanto más predictivas son las teorías y cuanto más precisas y arriesgadas esas predicciones, tanto más falsable es la teoría y mejor es. Por eso, el método científico consiste en falsar las teorías, no en confirmarlas. Cierto es que recurre a la idea de «corroboración» de las teorías cuando han superado numerosos intentos de falsación, lo que algunos han considerado otra manera de aceptar la confirmación y seguir anclado en la inducción. Sabido es que Thomas Kuhn dio un vuelco epistemológico en el panorama popperiano cuando escribió *The structure of scientific revolutions*, una historia de la ciencia que sugería que las pruebas y la razón no determinaban qué teorías se abandonaban y qué teorías se aceptaban. Apelaba a las fuerzas sociales como factores que intervenían en el desarrollo de la ciencia.

—Luis Alonso



IRIS RUNGE. A LIFE AT THE CROSSROADS OF MATHEMATICS, SCIENCE, AND INDUSTRY

Por Renate Tobies. Springer; Basilea, 2012. (Traducción de un libro publicado originalmente en alemán: *«Morgen möchte ich wieder 100 herrliche Sachen ausrechnen». Iris Runge bei Osram und Telefunken*. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2010).

Matemáticas y electrones

Iris Runge y la matemática aplicada en las primeras décadas del siglo XX

Iris Runge (1888-1966), matemática alemana, fue pionera en la aplicación industrial de métodos estadísticos y en el desarrollo de métodos gráficos de integración. Hija del matemático Carl Runge (1856-1927) y de Aimée du Bois-Reymond —a su vez hija del físico Emile du Boys-Reymond—, Runge creció en el seno de una familia extensa, cosmopolita e igualitaria, que favoreció muy activamente la realización profesional de sus grandes dotes intelectuales. La formación de Runge y su actividad matemática en la industria eléctrica tuvieron lugar en momentos de profundo cambio en las relaciones entre ciencia, tecnología e industria, cambios que afectaron a las carreras de las mujeres de ciencia. Esta biografía es, por ello, mucho más que la biografía de una matemática industrial: es también un estudio sobre la educación y profesionalización de las mujeres en las décadas en torno a 1900; un análisis de las posibilidades y retos que la industria eléctrica y de las comunicaciones planteó a los matemáticos en esos años; y finalmente una reflexión sobre el desarrollo de métodos numéricos y estadísticos de investigación y control de calidad en la era previa a la computación electrónica.

Renate Tobies describe en el primer capítulo las líneas historiográficas que se entrecruzan en su trabajo: la historia de la educación y las profesiones; la historia de las matemáticas y sus aplicaciones; y la historia social de la ciencia. Cada una de ellas genera uno de los tres capítulos centrales del libro, dedicados respectivamente a la formación de Runge, a las matemáticas en Osram y Telefunken, y a las interacciones entre ciencia, política y sociedad que marcaron su vida y su carrera. Un capítulo de conclusiones y un apéndice documental completan un volumen denso, documentado, historiográficamente sólido y ocasionalmente excesivo en sus contenidos y en el detalle de la exposición.

En el capítulo 2, dedicado a los «grupos formativos», Tobies describe el conjunto de círculos intelectuales (*thought collectives*, concepto que toma de Ludwig Fleck) a los que perteneció Runge, incluyendo entre otros al grupo familiar, al de sus compañeras de clase y al de sus

camaradas políticos. Runge perteneció a la generación pionera de mujeres que tuvo que superar el examen de acceso a la universidad (*Abitur*) por medios excepcionales, ya que hasta 1908 no hubo en Prusia escuelas para chicas que cualificaran para el acceso a la universidad. En Hannover, donde transcurrió parte de su infancia, Runge fue a una escuela secundaria para chicas, donde brilló como «un genio matemático». La mayoría de las alumnas eran tan ambiciosas como ella y acabaron realizando una tesis doctoral. El capítulo deja claro que la capacidad y las expectativas académicas de las mujeres de ciencia no han sido nunca un asunto estrictamente personal, sino que tienen una dimensión social.

El capítulo 3, el más extenso, trata sobre las matemáticas en Osram y Telefunken. En 1923 Runge entró a trabajar en el departamento de investigación de Osram, empresa de fabricación de bombillas y tubos catódicos fundada en 1919 por los tres gigantes de la industria eléctrica alemana, Siemens & Halske, AEG y Auer, con sede en Berlín. En 1939 Runge será transferida a Telefunken, tras adquirir esta la sección de tubos catódicos. Estas compañías habían empleado desde su creación a ingenieros eléctricos sin conocimientos matemáticos avanzados. El incremento de la producción y la sofisticación tecnológica de los productos conllevó el uso creciente de métodos matemáticos en los procesos de fabricación, control de calidad y diseño, y favoreció la incorporación de matemáticos profesionales como Runge. Tobies analiza de manera brillante y convincente la cultura experimental en los laboratorios industriales, el papel de las matemáticas y la importancia de estos desarrollos para la comprensión de las relaciones entre ciencia e industria.

El capítulo incluye la sección matemáticamente más exigente del libro (3.4), en la que se discute el papel de las matemáticas como puente entre disciplinas científicas. Runge y sus colegas en Osram desarrollaron métodos estadísticos de control de calidad; por ejemplo, calcularon tablas para determinar el tamaño de una muestra de control, según el grado de calidad requerido. Algunos de estos trabajos fueron publicados en revistas científicas, y reunidos en el primer manual sobre aplicación de la estadística a los problemas de la producción en masa (*Anwendungen der mathematischen Statistik auf Probleme der Massenfabrikation*, Springer, Berlín, 1927). Runge desarrolló también métodos gráficos de integración, y preparó la reedición en 1931 de uno de los primeros manuales sobre el uso de estos métodos en ciencia y tecnología (*Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik*, por Marcello Pirani, 1914).

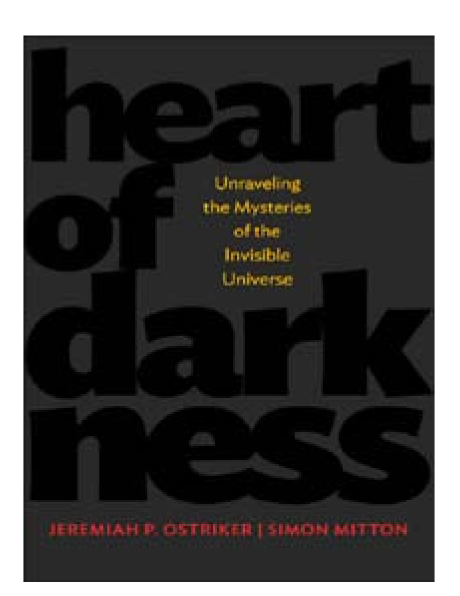
El título original del libro, en alemán, refleja la pasión de Runge por su trabajo y el valor intelectual de la aplicación de las matemáticas en la investigación industrial: «Mañana quiero hacer 100 maravillosos cálculos más» (p. 221). Runge utilizó sus conocimientos para investigar una de las tecnologías punta de comunicación en los años previos a la Segunda Guerra Mundial: los tubos de electrones, usados principalmente en aparatos de radio para rectificar, amplificar o modular señales eléctricas —funciones que asumirán los transistores después de la guerra.

El último capítulo del libro trata sobre las relaciones entre ciencia, política y sociedad, en la Alemania de Weimar (1919-1933) y bajo el nazismo. Tobies se hace eco de los numerosos trabajos recientes sobre la cuestión, que sin embargo apenas han incidido sobre la historia de los laboratorios industriales. Runge, que trabajó en proyectos militares para Telefunken durante la Segunda Guerra Mundial, se enfrentó a la paradoja de que la ciencia que le había servido para emanciparse profesionalmente servía ahora para consolidar un régimen al que se oponía con todas sus fuerzas. La discusión de Tobies no elude estos dilemas y ofrece una perspectiva nueva sobre el exilio interior de matemáticos y científicos alemanes.

Completa la obra un apéndice documental que incluye una cronología, una relación de las publicaciones de Runge, y fragmentos de sus publicaciones e informes sobre el trabajo en el laboratorio.

El libro es, en definitiva, una valiosa aportación a nuestro conocimiento sobre la profesionalización de la matemática aplicada y las perspectivas académicas, laborales y personales de una mujer de ciencia en la Alemania de la primera mitad del siglo xx.

—Xavier Roqué
Centro de Historia de la Ciencia
Universidad Autónoma de Barcelona



HEART OF DARKNESS. UNRAVELING THE MYSTERIES OF THE INVISIBLE UNIVERSE

Por Jeremiah P. Ostriker y Simon Mitton. Princeton University Press; Princeton, 2013.

Naturaleza del universo

Lo que sabemos de sus dos componentes mayoritarios

Las primeras inquisiciones racionales del hombre versaron sobre la naturaleza del mundo entorno. Una inquietud que le acompañó a lo largo de la historia y jalona las etapas principales del curso de la ciencia. Nacieron y se desarrollaron modelos cosmológicos, que fueron sustituidos por otros más exactos merced a la introducción de nuevos conceptos físicos y la ayuda de una instrumentación perfeccionada. A lo largo de los últimos 30 años, hemos llegado a conocer que dos componentes, materia oscura y energía oscura, tienen la llave del destino del universo. Merecen reseñarse, en particular, las pruebas que avalan el modelo «materia oscura fría lambda», que se expone aquí por Simon Mitton y Jeremiah Ostriker, pionero este del campo abordado. Cumplen en su

exposición la triple exigencia de toda descripción genuina de la ciencia astrofísica: aplicación de la medición directa y observación, introducción de la modelización matemática y contrastación de las hipótesis formuladas.

Lo invisible gobierna aquí lo invisible, mientras que lo infinitésimo determina lo cósmico. No es un galimatías pseudopoético, sino rigurosa inferencia lógica. Miremos a nuestro alrededor. Vemos paredes, mesas, sillas. Todo está hecho de átomos y moléculas, protones, neutrones y electrones, como las alcachofas, los ratones o el planeta Marte. Si todo ello consta de los mismos factores, cabría deducir que el resto del universo esté construido con idéntica argamasa. No opinan así los astrónomos. Atribuyen nada menos que el 95 por ciento del cosmos a dos tipos diferentes de material extraño. Uno, la materia oscura, posee masa; su gravedad ayuda a que el universo se mantenga junto. El otro, la energía oscura, impulsa la expansión del universo. Las galaxias forman cúmulos allí donde la densidad de materia oscura es mayor. Aunque escapa a la observación, la gravedad de una masa de materia oscura curva la luz procedente de galaxias lejanas en un proceso denominado de lente débil. Merced a ello pudo realizarse un análisis estadístico de decenas de miles de galaxias que revelan la distribución de materia oscura.

La cosmología, estudio de la naturaleza, formación y evolución del universo, ha experimentado una transformación radical desde los años sesenta. Se partía de dos modelos vigorosos y enfrentados: la teoría de la gran explosión (*big bang*) y la teoría del estado estacionario del universo. Escaseaban datos y pruebas contundentes que pudieran inclinar la balanza. Mas las observaciones realizadas a lo largo de estos decenios han confirmado ampliamente el primer modelo, con unos telescopios que se ha convertido en máquinas del tiempo que nos permiten inferir el pasado del cosmos. Cuando el telescopio espacial Hubble nos introduce en un rincón del universo alejado de nosotros siete mil millones de años luz, contemplamos el mundo tal como era hace 7000 millones de años, la mitad de lo que se supone es la edad del universo. En consecuencia, podemos ver y medir las diferencias entre entonces y ahora, cartografiar la evolución del universo. Por su parte, los radiotelescopios nos revelan el camino hasta el momento en que los fotones emergieron de la sopa primordial que los mantuvo aprisionados durante los primeros 300.000 años desde la singularidad de la gran explosión; con ello se nos ofrece una visión de la radiación residual. Podemos, por tanto, ver y medir directamente las tenues fluctuaciones primordiales, que crecen a través de la acción de la gravedad para convertirse en el mundo variopinto de las galaxias, estrellas y planetas.

No hemos encontrado todavía pruebas directas de materia oscura ni de energía oscura en laboratorios terrestres. Sin embargo, los indicios sobre su predominio aumentan por días. La materia oscura se descubrió, en los años 30 del siglo pasado, en los supercúmulos de galaxias, las mayores estructuras autogravitatorias del universo. Se supuso que residiría en el espacio intergaláctico. Luego, en los setenta, se la situó en los aledaños de galaxias normales, rodeándolas, a modo de halos. Los primeros cálculos sistemáticos revelaron que la propia concentración cósmica de materia oscura podía explicar no solo esos fenómenos observados, sino también, más fundamentalmente, la formación de galaxias y cúmulos. En los años noventa se descubrió la cuantía de materia y gravedad consiguiente necesarias para causar el desarrollo de estructuras.

Los grandes telescopios ópticos nos han suministrado imágenes brillantes y distorsionadas de objetos extremadamente alejados, imágenes que pudieran interpretarse como causadas por la intervención de masas de materia que actúan a modo de lentes gravitatorias, amplificando la imagen de objetos mucho más lejanos, un efecto predicho por Einstein. Las fuerzas gravitatorias que emergen de la materia oscura instan la concentración de materia ordinaria en galaxias. Pero ahora se sabe que los componentes químicos ordinarios de planetas y estrellas, el material que emite y absorbe luz, constituyen el cuatro por ciento del total: la guinda del pastel. Pero el pastel consta de materia oscura, energía oscura y radiación electromagnética, siendo la energía oscura la levadura que hincha el pastel, por seguir con la metáfora.

¿En qué consiste la materia oscura? ¿Existe en realidad necesariamente en su existencia o se trata simplemente de un recurso de la ciencia para cuadrar determinada interpretación del universo? Desde el punto de vista cronológico, la historia empieza con Fritz Zwicky, astrónomo nacido en Varna (Bulgaria), que se educó en el Instituto Federal Suizo de Tecnología y se trasladó al Caltech norteamericano en 1925. Trabajó la mayor parte de su vida en los observatorios Monte Wilson y Monte Palomar. Fue el descubridor de la materia oscura, llamándole así (*dunkle Materie*) en 1937, en un artículo donde analizaba la dinámica de los cúmulos de galaxias.

Pasaron decenios hasta que los físicos se percataran del alcance de tal descubrimiento. A grandes rasgos, Zwicky halló, marcó y catalogó cúmulos gigantes de galaxias y se esforzó por entender qué es lo que podía mantener juntas semejantes macroestruturas. En esos cúmulos, las galaxias desarrollan unas velocidades celerísimas, del orden de 1000 kilómetros por segundo. Pese a lo cual, ni salían despedidas ni se dispersaban por el medio. Sin duda, había alguna fuerza que mantenía íntegros los cúmulos. El candidato obvio para esa fuerza era la de la gravedad, merced a la cual nuestro satélite sigue su órbita alrededor de la Tierra. Ahora bien, para que la gravedad adquiera una intensidad suficiente que logre sostener la cohesión de los cúmulos gigantes, debían poseer una masa mucho mayor que la que se ponía de manifiesto con el número de galaxias observadas, concediendo a cada galaxia la masa normalmente admitida.

La fuerza de la gravedad es proporcional a la cantidad de masa. Si suponemos que la estrella promedio hallada en estos sistemas tenía la masa de nuestro Sol, entonces la fuerza gravitatoria local sería deficiente al menos en un factor de 100 para ejecutar la tarea de mantener unidos los cúmulos galácticos. De ese modo, Zwicky postulaba que debía haber algo más en los cúmulos, a saber, materia oscura, que aportara la masa extra y fuera la responsable de que las galaxias no salieran despedidas fuera de los cúmulos.

En 1937 Horace Babcock, del observatorio Lick, se valió de un nuevo espectrógrafo que acababa de diseñar Nicholas Mayall que permitía investigar el tenue brillo superficial de regiones de las galaxias, para obtener la curva de rotación de Andrómeda, nuestra galaxia vecina; no solo en sus regiones centrales, sino también en las muy alejadas del centro. Babcock descubrió un fenómeno inesperado. A diferencia de lo que ocurre en nuestro sistema solar, la velocidad de rotación de la galaxia no decaía con el incremento del radio, sino que persistía constante. Incluso parecía aumentar en las zonas exteriores, oscuras, de Andrómeda. De

ese modo, el primer empeño serio en determinar la distribución de masa del interior de una galaxia aportaba ya una prueba sólida de la existencia de materia oscura. Ese trabajo de Babcock, junto con el análisis de Zwicky, constituyeron los principales hallazgos relativos a la materia oscura que se realizaron decenios antes de que su existencia recibiera una aceptación mayoritaria.

Lo que acontece en los setenta. En su redescubrimiento tuvo activa participación uno de los autores de la obra (Ostriker), junto con Jim Peebles y Amos Yahil, que redactaron un artículo en 1974 de título explícito: *The size and mass of galaxies, and the mass of the universe*, donde revisaban lo conocido sobre curvas de rotación de zonas alejadas del centro de las galaxias; todas ellas indicaban que la masa de cada uno de esos sistemas parecía aumentar en las partes exteriores a una ritmo proporcional al tamaño de la religión estudiada. Otra forma de expresar esos resultados peculiares era atender a la razón entre la luz emitida por una galaxia y la masa.

A finales de los setenta y comienzos de los ochenta las pruebas más convincentes sobre la materia oscura las recabaron Vera Rubin, Kent Ford y sus colaboradores. Este grupo hizo uso de una nueva técnica electrónica que permitía medir velocidades de zonas más alejadas del centro galáctico que ninguno de los métodos empleados hasta entonces. Hay hoy muchas más pruebas sobre la presencia de materia oscura; por ejemplo, el mencionado efecto de las lentes gravitatorias.

La expresión «energía oscura» fue acuñada por Michael Turner en 1998; designa cualquier material capaz de dar cuenta de la aceleración del universo observada. No se trata de una denominación acertada por su exactitud, habida cuenta de que la nota distintiva de la energía oscura no es su energía, sino su contribución como presión negativa. La energía oscura no tiene contrapartida en la Tierra. Se trata de una fuerza muy débil que, a diferencia del resto, adquiere mayor intensidad con la distancia. La evolución del universo en expansión, así como el desarrollo de estructuras en su interior, guardan relación con la intensidad del campo gravitatorio y con la energía potencial que contiene. En el modelo de universo avanzado por Einstein, en los primeros decenios del siglo xx, con la constante cosmológica, existe un equilibrio exacto de fuerzas, donde la constante cosmológica, que insta el alejamiento de las galaxias, se ajusta con la gravedad, que las atrae. Imaginemos ahora que al alejarlas ligeramente, la gravedad se torna más débil (puesto que opera inversamente con el cuadrado de la distancia), pero la fuerza que insta su alejamiento se torna más fuerte (puesto que la nueva fuerza aumenta con la separación).

De acuerdo con el modelo cosmológico estándar, la forma más abundante de materia en el universo presente es la energía oscura. El componente menos conocido, también. Se la supone responsable de la aceleración del universo. Existen muchas líneas de prueba, recabadas con la batería de nuevos telescopios e instrumentación refinada (detectores electrónicos, radioastronomía y astronomía de rayos X), que contribuyeron a la ampliación del horizonte físico para los observadores, así como a la apertura de zonas invisibles del espectro electromagnético.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Octubre 1963

Los zulús y la presión sanguínea

«Un estudio sobre la hipertensión entre los zulúes realizado en la Unión Surafricana por Norman A. Scotch, de la Escuela de Salud Pública de la Universidad Harvard, informa que la hipertensión, o presión alta en la sangre, se halla más extendida entre los zulús urbanos que entre los de las "reservas" rurales. Scotch lo atribuyó primero al mayor estrés que produce la agitada y variada vida en el lugar, donde la predecible ansiedad asociada a la vida urbana y la destribalización se ve agravada por el *apartheid*, la rigurosa política surafricana de segregación racial. Sin embargo, Scotch cree que la urbanización tal vez no conlleve en sí misma estrés. "No se trata solo del efecto del cambio, sino de que este origine prosperidad o fracaso". Los individuos más propensos a la hipertensión eran "los que conservaban las prácticas culturales tradicionales y no se adaptaban bien a las exigencias de la vida urbana".»



Octubre 1913

Gasolina para los automovilistas

«Ante las evidentes ventajas de las máquinas expendedoras automáticas, una empresa de Michigan ha sacado al mercado una que vende gasolina para los automovilistas. A quien necesite combustible le basta con introducir una pieza de cincuenta centavos en la ranura, situar el extremo de la manguera flexible en su depósito de gasolina y accionar la manivela. La máquina expende 760 litros de combustible a la semana. No solo funciona sin otro cuidado que el preciso para reponer gasolina en su depósito, sino que puede servir el producto durante las veinticuatro horas y todo conductor que conozca su ubicación no tendrá que despertar a un soñoliento dependiente en mitad de la noche.»

Adelantos de la aviación

«El encuentro de aviación en Reims organizado por el Aero Club de Francia se celebró en el Aeródromo de Champagne. En la competición participaron siete marcas: Breguet, Caudron y Goupey (biplanos); y Deperdussin, Morane-Saulnier, Nieuport y Ponnier (monoplanos). Son suficientemente representativas para ofrecer una idea del estado de perfección alcanzado por la ejecutoria de la aviación francesa. El ganador de la Copa Internacional de Aviación, también conocida como Copa Gordon-Bennett, fue Maurice Prévost, que completó 200 kilómetros a una velocidad de 200,803 kilómetros por hora. El aeroplano es un Deperdussin monocasco, equipado con un motor Gnôme de 160 caballos (*fotografía*).»



Octubre 1863

Indio, un nuevo metal

«Una asamblea reciente de la Sociedad de Química del Colegio Universitario Unión informaba acerca de un nuevo metal: "Desde que el químico alemán Bunsen inventó el espectroscopio en 1860, se han descubierto con su ayuda varios elementos nuevos. En verano de 1863, habiéndose detectado minúsculas cantidades de talio en numerosos productos de la fundería de Freiberg (Sajonia), F. Reich y T. Richter examinaron algunos de los minerales en los laboratorios de la fábrica con el fin de averiguar su origen. Los minerales se prepararon y se examinaron antes de buscar el talio con el espectroscopio. No se halló ninguna línea correspondiente al talio; pero, en cambio, apareció una azul añil, completamente nueva y diferente a la producida por cualquier sustancia conocida. Los señores Reich y Richter la atribuyeron a un nuevo metal, al que denominaron indio".»

A la busca del cedro

«En Nueva Jersey hay quienes hacen negocio al recuperar cedros que llevan enterrados centenares de años en cenagales para cortarlos en tejas, se dice que de una magnífica calidad. El terreno de esas zonas alcanza un valor muy alto, entre 1250 y 2500 dólares por hectárea. Una peculiaridad de los cenagales es que el suelo es totalmente vegetal, muy a menudo de unos seis metros de grosor. La tierra turbosa se forma por la acumulación constante de restos vegetales. Se hallan árboles enterrados a todas las profundidades, hasta el sustrato duro del fondo. Por el espesor de la capa vegetal que acumula encima, se cree que el depósito de madera tiene dos mil años de antigüedad y se encuentra en un excelente estado.»



EL APARATO GANADOR: El aeroplano Deperdussin, con un motor Gnôme de 160 caballos, logró la marca de velocidad aerodinámica en 1913.

SCIENTIFIC AMERICAN SUPLEMENT, VOL. LXXVI, N.º 1973, 25 DE OCTUBRE DE 1913



NÚMERO MONOGRÁFICO

ALIMENTACIÓN

SOCIOLOGÍA
El cambio alimentario en las sociedades modernas

NUTRICIÓN
¿Cuántas calorías aporta un alimento?

AGRICULTURA
Cultivar con la ayuda de hongos y bacterias

SALUD PÚBLICA
Propuestas para erradicar la obesidad

INNOVACIÓN
Historia de la comida procesada

BIOTECNOLOGÍA
Panorama del debate sobre los transgénicos

PSICOLOGÍA
Emociones y vegetarianismo

NEUROCIENCIA
Adictos a la comida

PESQUERÍAS
Efectos del cambio climático en el consumo de pescado

ANTROPOLOGÍA
Dieta y evolución humana

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Sara Arganda: *Los beneficios del sueño*; Alberto Ramos: *¿Qué es real?*; Luis Bou: *Un delfín con prótesis*; Mercè Piqueras: *¿Se halla la cultura en los genes?*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Andrés Martínez: *Foro científico*; Juan Pedro Adrados: *Herschel y el rompecabezas de la radiación infrarroja*; Joandomènec Ros: *Insectos necrófagos*; Fabio Teixidó: *Las próximas megainundaciones*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España